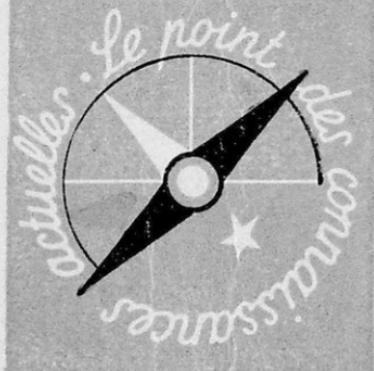


*que
sais-je?*

*Kor Mitsouros
Kudupul*

L'ÉNERGIE ATOMIQUE

PAR ALBERT BOUZAT



**PRESSES UNIVERSITAIRES
DE FRANCE**

Que sais-je?

Catalogue général

1. Les étapes de la biologie.
2. De l'atome à l'étoile.
3. Les certitudes du hasard.
4. Hist. de l'Afrique.
5. Comment se défend l'organisme.
6. Le peuple des abeilles
7. Hist. de l'électricité.
8. Le système nerveux.
9. Les grandes religions
10. La Corporation.
11. Le cancer.
12. Les vitamines.
13. L'astronomie sans télescope.
14. L'éducation nouvelle
15. La tuberculose.
16. La terre et son hist.
17. Les premières civilisations de la Méditerranée.
18. Histoire de l'architecture.
19. L'exploitation rationnelle des abeilles.
20. La vie créatrice de roches.
21. Les ultrasons.
22. L'alimentation humaine.
23. La terre, source de richesses.
24. Les rêves.
25. Histoire de l'Asie.
26. Le mobilier français.
27. Les mécanismes économiques.
28. La peinture moderne
29. Automates et automatisme.
30. La télévision.
31. Les étapes de la médecine.
32. L'économie humaine.
33. Radium et radioactivité.
34. Histoire de Paris.
35. Les étapes de la chimie.
36. Hist. de la propriété.
37. La relativité.
38. Histoire des Etats-Unis.
39. Les hormones.
40. Hist. de la musique.
41. Radionavigation et radioguidage.
42. Les étapes des mathématiques.
43. Histoire de la navigation.
44. La monnaie et le change.
45. Les arts du feu.
46. Les matières plastiques.
47. Les grandes philosophies.
48. La lumière.
49. Le roman français depuis 1900.
50. La sexualité.
51. Les migrations des animaux.
52. La folie.
53. Les microbes.
54. Les étapes de l'archéologie.
55. Hist. du commerce.
56. La défense de nos cultures.
57. L'exploitation du hasard.
58. Le péril vénérien.
59. L'équipement électrique de la France.
60. La guerre des matières premières.
61. La toxicologie.
62. L'agriculture coloniale.
63. Technique du sport.
64. Les radiations et la vie
65. Les étapes de la géographie.
66. Hist. de la peinture.
67. Etude physique de la terre.
68. L'embryologie.
69. La formation de la France au moyen âge.
70. Les rayons X.
71. L'éducation des enfants difficiles.
72. La vie dans les mers.
73. Les expéditions polaires.
74. Hist. de la sculpture.
75. Hist. de l'Océanie.
76. Les assurances.
77. Les arts d'Extrême-Orient.
78. La croissance.
79. Origine des plantes cultivées.
80. La lutte pour les denrées vitales.
81. Histoire du cinéma.
82. La littérature symboliste.
83. Les insectes et l'homme.
84. Le papier et les dérivés de la cellulose.
85. La littérature de la Renaissance.
86. Les chemins de fer.
87. Le tabac.
88. Hist. de la vitesse.
89. La météorologie.
90. Le coton.
91. Les probabilités et la vie.
92. Les océans.
93. Les matières premières de synthèse.
94. La chimie du cerveau
95. La littérature du siècle classique.
96. Les étapes de la métallurgie.
97. La mesure du temps.
98. La vision.
99. La T. S. F.
100. Les ports maritimes.
101. La littérature allemande.
102. L'adolescence.
103. Le "lé".
104. Les colloïdes.
105. Les grands travaux.
106. La genèse de l'humanité.
107. Hist. de Byzance.
108. Les étapes de la poésie française.
109. Histoire de la géométrie.
110. Les industries de l'alimentation.
111. La comptabilité.
112. La prévision économique.
113. Génétique et hérédité.
114. La littérature espagnole.
115. Napoléon.
116. La cryptographie.
117. Le parasitisme.
118. Techn. du cinéma.
119. Les colorants.
120. La bataille des trusts.
121. L'orientation professionnelle.
122. Le froid.
123. Le romantisme français.
124. Le diabète.
125. L'organisation scientifique du travail
126. Histoire des techniques.

Suite page 3
de la couverture

L'ÉNERGIE ATOMIQUE

DÉPOT LÉGAL

1^{re} édition 1^{er} trimestre 1949

TOUS DROITS

de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays

COPYRIGHT

by *Presses Universitaires de France*, 1949

« QUE SAIS-JE ? »
LE POINT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

L'ÉNERGIE ATOMIQUE

par

Albert BOUZAT

Doyen honoraire de la Faculté des Sciences de Rennes



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

—
1949

19119

TABLEAU I
Classification périodique des éléments

Pé-riode	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 5	Gr 6	Gr 7	Gr 8
1	H ¹ 1,0080							He ² 4,003
2	Li ³ 6,940	Be ⁴ 9,02	B ⁵ 10,82	C ⁶ 12,010	N ⁷ 14,008	O ⁸ 16,000	F ⁹ 19,00	Ne ¹⁰ 20,183
3	Na ¹¹ 22,997	Mg ¹² 24,32	Al ¹³ 26,97	Si ¹⁴ 28,06	P ¹⁵ 30,98	S ¹⁶ 32,066	Cl ¹⁷ 35,457	Ar ¹⁸ 39,944
4	K ¹⁹ 39,096 Ca ²⁰ 40,08 Cu ²⁹ 63,54	Sc ²¹ 45,10 Zn ³⁰ 65,38	Ti ²² 47,90 Ga ³¹ 69,72	V ²³ 50,95 Ge ³² 72,60	Cr ²⁴ 52,01 As ³³ 74,91	Mn ²⁵ 54,93 Se ³⁴ 78,96	Fe ²⁶ 55,85 Co ²⁷ 58,94 Ni ²⁸ 58,69	Kr ³⁶ 83,7
5	Rb ³⁷ 85,48 Ag ⁴⁷ 107,880	Sr ³⁸ 87,63 Cd ⁴⁶ 112,41	Y ³⁹ 88,92 In ⁴⁰ 114,76	Zr ⁴⁰ 91,22 Sn ⁵⁰ 118,70	Nb ⁴¹ 92,91 Sb ⁵¹ 121,76	Mo ⁴² 95,95 Te ⁵² 127,61	Ru ⁴⁴ 101,7 Rh ⁴⁵ 102,91 Pd ⁴⁶ 106,7	Xe ⁵⁴ 131,3
6	Cs ⁵⁵ 132,91 Au ⁷⁹ 197,2	Ba ⁵⁶ 137,36 Hg ⁸⁰ 200,61	Terres rares 57 à 71 Tl ⁸¹ 204,39	Cu ⁷² 178,6 Pb ⁸² 207,21	Ta ⁷³ 180,88 Bi ⁸³ 209,00	W ⁷⁴ 184,0 Po ⁸⁴ 210	Os ⁷⁶ 191,5 Ir ⁷⁷ 193,1 Pt ⁷⁸ 195,23	Rn ⁸⁶ 222
7	Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸ 226,05	Ac ⁸⁹ 227	Th ⁹⁰ 232,12	Pa ⁹¹ 231	U ⁹² 238,07		

57 La	138,92	60 Nd	144,27	63 Eu	152,0	66 Dy	162,46	69 Tm	169,4
58 Ce	140,13	61 Pr	140,92	64 Gd	156,9	67 Ho	164,94	70 Yb	173,04
59 Pr	140,92	62 Sm	150,43	65 Tb	159,2	68 Er	167,2	71 Lu	174,99

Eléments des terres rares....

..... 93 Np 237 94 Pu 239 95 Am 241 96 Cm 242

CHAPITRE PREMIER

PREMIÈRES DONNÉES SUR LA CONSTITUTION DES ATOMES ET SUR L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Classification périodique des éléments

Il y a près d'un siècle, le Français de Chancourtois, l'Anglais Newlands, l'Allemand Lothar Meyer, le Russe Mendéléeff ont montré qu'en rangeant les éléments par ordre de poids atomique, on fait apparaître une variation périodique de leurs propriétés. Cette périodicité se manifeste nettement dans la classification de Mendéléeff, que représente le tableau I. Les éléments sont rangés dans ce tableau suivant l'ordre de leurs poids atomiques croissants : chaque élément a ainsi un numéro d'ordre que l'on appelle son numéro atomique ou son nombre atomique. En haut et à droite du symbole de chaque élément, on a écrit son nombre atomique et au-dessous du symbole son poids atomique.

Le tableau comprend 7 périodes disposées suivant les lignes horizontales. La première période ne contient que 2 éléments : l'hydrogène et l'hélium. La deuxième et la troisième périodes contiennent chacune 8 éléments ; la quatrième et la cinquième chacune 18 ; la sixième est formée de 32 éléments. La septième s'arrête d'une manière inattendue après son 6^e élément, l'uranium, qui est de tous les élé-

ments se trouvant dans la nature, celui qui a le poids atomique le plus élevé.

La périodicité des propriétés apparaît immédiatement à l'examen de la table ; les corps qui se trouvent les uns au-dessous des autres dans une colonne verticale, c'est-à-dire qui occupent dans les différentes périodes des places correspondantes, présentent des analogies frappantes.

Critique de la classification périodique. — L'argon est placé avant le potassium bien que son poids atomique soit plus grand : cette inversion est nécessaire pour que les corps semblables soient dans la même colonne. On est aussi obligé d'inverser les places de l'iode et du tellure. Nous verrons comment ces inversions s'expliquent et pourquoi on met également le cobalt avant le nickel et le thorium avant le protactinium. La quatrième, la cinquième et la sixième période comprennent chacune une triade à quoi rien ne correspond dans les trois premières périodes. Enfin la réunion des 15 éléments des terres rares paraît avoir un caractère arbitraire. Il faut seulement conclure de là que les créations de la nature n'ont pas la simplicité et la symétrie des constructions *a priori* de notre esprit.

Importance de la classification périodique. — Lorsque Mendéléeff a publié sa table, elle ne contenait que les 63 éléments connus à cette époque. Pour faire apparaître la périodicité de leurs propriétés, Mendéléeff avait dû laisser des cases vides. Mais il avait prédit que ces vides seraient remplis. Mieux, il avait prévu les propriétés des éléments nouveaux qui viendraient combler les lacunes, par comparaison avec les propriétés des éléments voisins. Les découvertes faites par la suite ont confirmé ses idées d'une façon éclatante. Aujourd'hui, toutes les cases sont occupées ; les gaz inertes : hélium, néon, argon,

krypton, xénon, radon, ont complété le tableau. On a même pu le prolonger au delà de l'uranium par la création artificielle des éléments appelés transuraniens.

Conclusion. — Si les atomes étaient des êtres indépendants, irréductibles en particules plus simples, on ne voit pas d'où viendrait le caractère de périodicité que la classification de Mendéléeff met en lumière. Comme leurs propriétés varient de l'un à l'autre avec régularité, il est naturel de penser qu'ils sont formés des mêmes constituants, qui, à mesure que l'atome devient plus lourd, se disposent de manière à donner à certaines propriétés une allure périodique. La classification de Mendéléeff nous apparaît ainsi comme un premier pas dans la découverte de la structure des atomes.

L'électricité et la matière

Electrolyse. — On sait que les électrolytes sont décomposés par le courant qui les traverse. Ainsi, lorsqu'on fait passer un courant dans du chlorure de sodium fondu, du sodium est mis en liberté à l'électrode de sortie du courant, c'est-à-dire à la cathode, et du chlore à l'électrode d'entrée, c'est-à-dire à l'anode. D'une manière générale, l'électrolyte est divisé en deux parties qu'on appelle ions. La liaison qui unit les deux ions de l'électrolyte a été appelée électrovalence. Les deux ions peuvent être unis par une électrovalence comme dans $\text{Cl} - \text{Na}$, par 2 électrovalences comme dans $\text{Cl}^2 = \text{Ca}$, par 3 électrovalences comme dans $\text{Cl}^3 \equiv \text{Al}$, par 4 électrovalences comme dans $\text{Cl}^4 \equiv \text{Pt}$.

D'après les lois de Faraday, la quantité d'électricité dont le passage rompt une électrovalence-gramme est indépendante des conditions de l'élec-

trolyse et elle est la même pour tous les électrolytes ; elle est égale à 96.500 C ; on lui a donné le nom de faraday.

Le sodium étant univalent, le passage d'un faraday met en liberté un atome-gramme de sodium, c'est-à-dire 22 gr 997 de sodium. Le calcium étant bivalent, le passage de deux faradays est nécessaire pour mettre en liberté un atome-gramme, c'est-à-dire 40 gr 08 de calcium, etc.

Si le dépôt de matière aux électrodes paraît continu, c'est à cause de l'extrême petitesse des atomes : en réalité, il se fait ion par ion. L'électricité étant transportée par les ions, l'arrivée d'électricité aux électrodes est également discontinue. On est ainsi conduit à attribuer à l'électricité, comme à la matière, une structure granulaire. On sait qu'une molécule-gramme renferme $6,02 \times 10^{23}$ molécules (1) ; de même un atome-gramme contient $6,02 \times 10^{23}$ atomes et un ion-gramme $6,02 \times 10^{23}$ ions ; un ion univalent apporte donc à l'électrode $\frac{96\ 500}{6,02 \times 10^{23}}$ C = $1,602 \times 10^{-19}$ C (2). Cette charge de $1,602 \times 10^{-19}$ C, c'est le grain d'électricité : on lui a donné le nom d'électron.

Rayons cathodiques. — Dans un tube de verre où on a fait le vide jusqu'à ce que la pression du gaz résiduel soit de l'ordre du centième de millimètre de

(1) Le nombre $6,02 \times 10^{23}$ est appelé nombre d'Avogadro : il est difficile de se le représenter. Nous aurons une idée du nombre de molécules que contient à 0° et sous la pression atmosphérique un petit cube de gaz, ayant seulement un millimètre de côté, par le temps qui serait nécessaire pour les compter. Si un être, aussi habile qu'infatigable, pouvait en compter cent par seconde, en ne prenant de repos ni jour ni nuit, il n'aurait terminé son dénombrement qu'au bout de quatre-vingt-dix mille siècles !

(2) On sait que le symbole 10^{-19} est équivalent à $\frac{1}{10^{19}}$. Par suite 10^{-19} est $\frac{1}{10^{19}}$.

mercure, faisons jaillir la décharge électrique entre une cathode terminée par un petit disque plan C et une anode A située dans le tube à une place quelconque (fig. 1), en établissant entre les 2 électrodes une différence de potentiel de plusieurs dizaines de milliers de volts. La cathode émet un faisceau de rayons qui manifestent leur trajectoire dans le tube par une faible luminosité communiquée sur leur passage au gaz raréfié ; ces rayons provoquent de plus

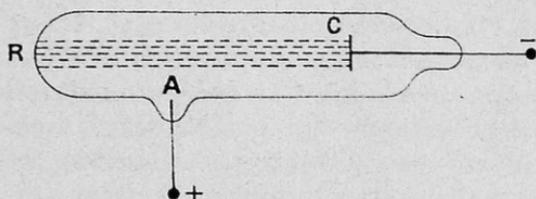


Fig. 1

une belle fluorescence verte de la paroi de verre dans la région R où ils la rencontrent. On leur a donné le nom de rayons cathodiques. Ils sont déviés soit par le champ électrique, soit par le champ magnétique.

En faisant arriver les rayons cathodiques dans un cylindre de Faraday relié à un électroscope, Perrin a pu montrer qu'ils transportent de l'électricité négative. Puisque nous avons attribué à l'électricité une structure granulaire, nous devons regarder les rayons cathodiques comme formés par des particules électrisées en mouvement. Quelles sont leur vitesse et leur charge ?

Vitesse et charge spécifique des particules des rayons cathodiques. — Faisons agir sur un faisceau de rayons cathodiques un champ électrique uniforme perpendiculaire à sa direction. On voit facilement que si le champ électrique a agi sur une lon-

gueur l , chaque particule électrisée est déviée, dans la direction du champ, d'un angle α , tel que :

$$(1) \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{v^2} \frac{e}{m} Hl$$

v étant la vitesse de la particule, e sa charge, m sa masse et H la valeur du champ électrique. D'ailleurs, on constate que le faisceau n'est pas étalé par le champ électrique, de telle sorte que α est l'angle de déviation du faisceau.

Soumettons maintenant le même faisceau de rayons cathodiques à un champ magnétique également perpendiculaire à sa direction. Les lois de l'électrodynamique permettant d'établir que, si le champ est uniforme, une particule électrisée du faisceau décrit, dans un plan perpendiculaire au champ, une circonférence de rayon R , tel que :

$$(2) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{v} \frac{e}{m} \mathcal{H}$$

\mathcal{H} étant l'intensité du champ magnétique. Le faisceau n'est pas étalé par le champ magnétique, de telle sorte que R est le rayon de la circonférence décrite par le faisceau.

Toutes les grandeurs, autres que v et $\frac{e}{m}$ qui figurent dans les équations (1) et (2) peuvent être mesurées ; ces deux équations font connaître v et $\frac{e}{m}$.

La vitesse des particules, qui est la même pour toutes les particules d'un faisceau, varie d'un faisceau à un autre suivant la différence de potentiel établie entre l'anode et la cathode pour produire les rayons. Elle va de 20.000 à 200.000 km par seconde.

Inutile d'insister sur cette vitesse vertigineuse qui approche de celle de la lumière.

Le quotient $\frac{e}{m}$ de la charge par la masse, c'est-à-dire la charge spécifique, a la même valeur quels que soient la vitesse des particules, le métal dont est formée la cathode, le gaz résiduel qui se trouve dans le tube. On est amené à penser que toutes les particules des rayons cathodiques sont identiques. L'expérience de Milikan, dont il sera parlé page 12, a montré qu'elles ne sont autres que le grain d'électricité négative, appelé électron négatif ou négaton.

Phénomènes thermo-ioniques. — Lorsqu'on porte un métal à l'incandescence il s'en dégage des négatons par une sorte d'évaporation électrique. Prenons, par exemple, une ampoule dans laquelle on a placé un filament de tungstène en face d'une plaque métallique, et où on a fait un vide aussi parfait que possible ; établissons entre le fil et la plaque une différence de potentiel d'une cinquantaine de volts, de sens tel que le fil soit cathode et la plaque anode ; puis amenons le fil de tungstène à l'incandescence ; les négatons émis par le fil de tungstène se mettent en mouvement sous l'influence du champ et créent un courant. Ce phénomène est utilisé pour redresser un courant alternatif, le courant ne passant que lorsque le fil incandescent est cathode. Il est également utilisé dans les lampes de T. S. F.

Phénomènes photo-électriques. — La lumière, qui frappe un métal, lui fait émettre des négatons pourvu que sa longueur d'onde soit inférieure à une certaine valeur qui dépend du métal. Pour les métaux alcalins, cette valeur limite se trouve dans le spectre visible ou même dans le spectre infrarouge ; pour le zinc ou l'aluminium, c'est celle d'une radiation ultraviolette. Sur ces faits sont basées les cel-

lules photoélectriques qui ont de nombreuses applications.

L'effet photoélectrique ne se produit pas seulement avec les métaux; les gaz traversés par des rayons de courte longueur d'onde — rayons ultraviolets et surtout rayons X — deviennent conducteurs de l'électricité. Les rayons arrachent des négatifs

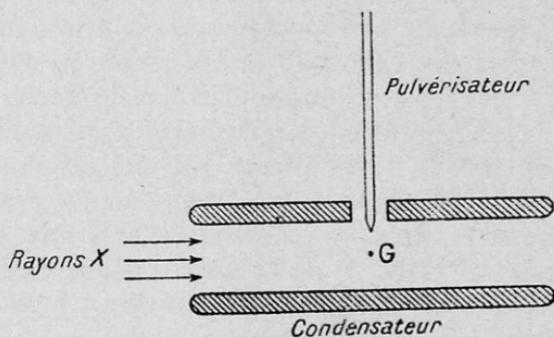


Fig. 2

tons aux molécules, qui passent ainsi à l'état d'ions positifs, tandis que les négatifs devenus libres se fixent sur d'autres molécules qui sont changées en ions négatifs. Lorsqu'un ion se trouve au voisinage d'une poussière ou d'un globule liquide microscopique, il y a attraction par influence et l'ion se colle sur la poussière ou le globule liquide en formant ce qu'on appelle un gros ion. Ces faits ont été mis à profit par Milikan pour la mesure de la charge de l'électron.

Expérience de Milikan. — Au moyen d'un pulvérisateur, on produit entre les plateaux horizontaux d'un condensateur électrique des gouttelettes d'huile dont le rayon est de l'ordre du micron (fig. 2). On éclaire vivement les gouttelettes et on les observe à

l'aide d'un microscope. Quand le condensateur n'est pas chargé, la gouttelette G tombe très lentement par suite du frottement contre le gaz qui l'entoure. Mais si on établit entre les armatures du condensateur une différence de potentiel créant un champ de quelques milliers de volts/cm et si de plus on fait traverser le gaz par un faisceau de rayons X, on voit la vitesse de la goutte varier par sauts brusques ; la goutte remonte si l'action du champ est assez grande et si elle est opposée à celle de la pesanteur.

On peut régler le condensateur de façon que la goutte reste immobile. A ce moment son poids p est équilibré par la force électrique He , H étant l'intensité du champ et e la charge de la goutte. En appliquant les lois de la viscosité des gaz, on peut déterminer le poids p de la goutte d'après sa vitesse de chute lorsqu'elle n'est pas soumise à un champ électrique. L'équation $p = He$, où p et H sont connus permet de connaître e . Les différentes valeurs de e obtenues sont entre elles comme des nombres entiers petits tels que : 2, 4, 3, 2, 1, 2, 3, 1, etc. La charge varie en effet suivant le nombre de particules électrisées fixées par la goutte. La plus petite valeur de e d'une longue série d'expériences est la charge d'une particule électrisée.

Milikan a trouvé que la charge d'une particule électrisée est de $1,60 \times 10^{-19}$ C : c'est la charge d'un ion élémentaire univalent d'un électrolyte (p. 8). L'électron des gaz conducteurs est identique à celui des électrolytes ; il est le même quel que soit le phénomène dans lequel il intervient et le corps dont il provient : c'est un constituant universel de la matière.

Ayant déterminé la charge e de l'électron et sa charge spécifique $\frac{e}{m}$, il est facile de calculer sa

masse m . Elle est égale à $9,10 \times 10^{-28}$ gr, soit mille huit cent trente-six fois plus petite que celle de l'atome d'hydrogène.

Rayons positifs. — Dans un tube producteur de rayons cathodiques, les négatons animés d'une grande vitesse, qui constituent les rayons, heurtent les molécules du gaz raréfié et leur arrachent un ou plusieurs négatons, les transformant en ions positifs. Ces ions, se dirigeant en sens inverse des négatons,

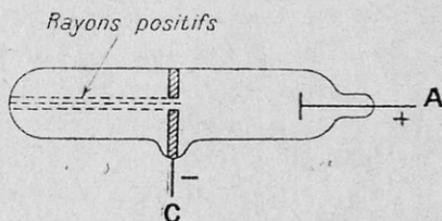


Fig. 3

reviennent vers la cathode C et, si celle-ci est percée d'un fin canal, ils forment dans l'espace situé de l'autre côté de la cathode, un faisceau de rayons qu'on a appelés rayons canaux ou rayons positifs.

Les propriétés des rayons positifs sont analogues à celles des rayons cathodiques ; comme eux, ils sont déviés soit par le champ électrique, soit par le champ magnétique ; mais, étant formés d'ions positifs tandis que les rayons cathodiques sont formés d'électrons négatifs, ils sont déviés en sens inverse des rayons cathodiques. Leur vitesse est beaucoup plus faible que celle des rayons cathodiques : elle ne dépasse guère 1.000 km par seconde.

Dans les électrolytes, la charge électrique est associée à la matière ; elle est aussi fixée sur la matière dans les rayons positifs ; tandis que le négaton des rayons cathodiques, des phénomènes thermo-ioni-

qués et des phénomènes photo-électriques est libre de tout support matériel.

Rayons X. — Les rayons X tombant sur un corps en arrachent des négatons (p. 11) ; inversement, lorsque des négatons animés d'une grande vitesse

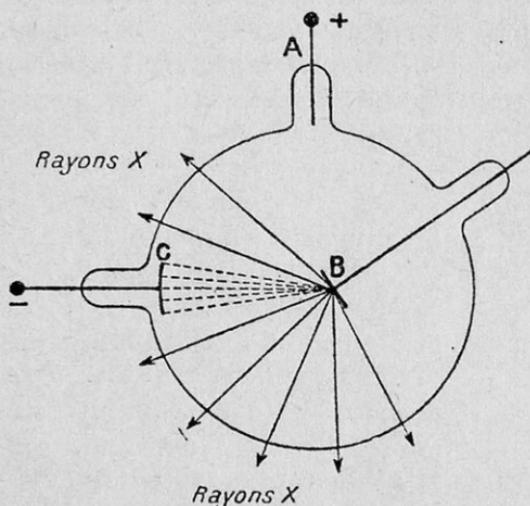


Fig. 4

rencontrent un obstacle matériel, il y a émission de rayons X.

On peut produire des rayons X en faisant converger les rayons cathodiques, émis par une cathode concave C, sur une plaque de métal B qu'on appelle l'anticathode (fig. 4) ; comme l'anticathode s'échauffe, elle est formée d'un métal peu fusible, généralement le tungstène. On préfère aujourd'hui utiliser les phénomènes thermo-ioniques pour produire les négatons (tube Coolidge) : ils sont émis par une spirale de tungstène F (fig. 5) portée à l'incandescence ; on leur communique une grande vitesse en établissant une différence de potentiel, qui atteint

couramment 50.000 V, entre la cathode C et la lame de tungstène A qui forme l'anticathode.

Les rayons X provoquent la fluorescence de diverses substances ; ils impressionnent la plaque photographique ; mais ils ne sont déviés ni par le champ électrique ni par le champ magnétique ; ils ne transportent pas de charge électrique.

Leur nature est analogue à celle des rayons lumineux ; ils n'en diffèrent que par leur longueur d'onde. Tandis que la longueur d'onde des rayons du spectre visible est comprise entre $0\mu 4$ et $0\mu 8$ (μ désignant le millième de millimètre ou micron), celle des rayons X courants est de l'ordre du millième ou dix-millième de micron.

Les rayons X traversent la plupart des corps en subissant une absorption plus ou moins forte ; ils sont d'autant plus pénétrants qu'ils ont une longueur d'onde plus courte. On sait qu'ils sont utilisés pour les examens radioscopiques ou radiographiques.

Comme ils peuvent produire des brûlures très dangereuses, les opérateurs se protègent avec des gants et des tabliers contenant du plomb. Les cellules cancéreuses étant plus rapidement détruites que les cellules normales, on emploie les rayons X dans le traitement du cancer.

Spectres des rayons X. Loi de Moseley. — Le spectre des rayons X ne comprend qu'un petit nombre de raies qui se détachent sur un fond continu. Leur position est caractéristique de l'élément qui constitue l'anticathode et elle est à très peu près la même, qu'il soit libre ou qu'il soit en combinaison. Si l'anticathode contient plusieurs éléments, le

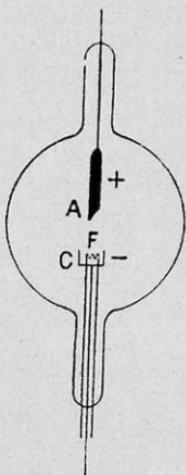


Fig. 5

spectre est l'exacte superposition de leurs raies.

Les spectres des divers éléments ont la même disposition générale, de telle sorte qu'il est facile d'y reconnaître une raie déterminée. A mesure que le nombre atomique de l'élément augmente, la longueur d'onde correspondant à la raie devient plus petite et, par conséquent, la fréquence plus grande.

En comparant la fréquence d'une même raie dans les spectres de tous les éléments de nombre atomique connu, Moseley a établi une loi très importante : « La racine carrée de la fréquence d'une même raie est une fonction linéaire du nombre atomique de l'élément. » Si on désigne par ν la fréquence de la raie, par A et B deux constantes propres à cette raie, par Z le nombre atomique de l'élément :

$$\sqrt{\nu} = A(Z - B)$$

La loi de Moseley donne au nombre atomique une base physique solide. Elle a confirmé l'inversion de l'argon et du potassium, de l'iode et du tellure ; elle a obligé à placer le cobalt avant le nickel, le thorium avant le protactinium.

Variation non périodique de certaines propriétés des atomes. — L'existence d'un plan général pour les spectres de rayons X manifeste de la façon la plus frappante la parenté des éléments. Mais, tandis que la classification de Mendéléeff montre une variation périodique de certaines propriétés, le spectre de rayons X varie toujours dans le même sens quand on range les éléments dans l'ordre de leurs numéros atomiques. Il y a donc des propriétés des atomes dont les variations sont périodiques, et d'autres dont les variations se produisent toujours dans le même sens.

Radioactivité

En 1896, Becquerel constata que les sels d'uranium émettent des rayons susceptibles d'impressionner les plaques photographiques, de produire des fluorescences variées et de rendre conducteurs les gaz qu'ils traversent : le rayonnement se produit même si le composé d'uranium a été enveloppé de papier noir, de telle sorte qu'il ne peut s'agir d'un phénomène de phosphorescence. Pierre et Marie Curie parvinrent à extraire des minerais d'uranium un corps nouveau, le radium, beaucoup plus radioactif que l'uranium et, par suite, se prêtant mieux à l'étude de la radioactivité. On connaît aujourd'hui une quarantaine d'éléments naturels radioactifs.

Rayonnement des corps radioactifs. — Les rayons émis par les corps radioactifs sont de trois sortes.

1^o Les rayons α formés par des hélium, c'est-à-dire des atomes d'hélium dont chacun a perdu deux négatons. Ce sont, on le voit, des rayons positifs particuliers. Leur vitesse, considérable pour des rayons positifs, peut atteindre 25.000 km par seconde. Ils sont très peu pénétrants ; dans l'air, sous la pression atmosphérique, ils s'arrêtent après avoir parcouru quelques centimètres ; dans une feuille d'aluminium, ils s'arrêtent après quelques centièmes de millimètre ;

2^o Les rayons β formés d'électrons animés de grandes vitesses. Ils sont analogues aux rayons cathodiques, mais leur vitesse est plus grande ; elle est le plus souvent supérieure à 100.000 km par seconde et elle peut atteindre une valeur voisine de celle de la lumière. Ils sont environ cent fois plus pénétrants que les rayons α ;

3^o Les rayons γ , découverts par le physicien français Villard, de même nature que les rayons lumi-

neux et les rayons X. Leur longueur d'onde est encore plus petite que celle des rayons X ; elle est comprise entre 0,25 et 0,005 unités angström, l'unité angström étant le dix-millième de micron (1). Ils sont très pénétrants ; certains ne sont pas complètement arrêtés après avoir traversé une plaque de plomb d'une épaisseur de 15 cm. Ce sont les rayons γ qui ont une action dans le traitement du cancer par le radium.

Il est facile de séparer les rayons α , les rayons β et les rayons γ . Sous l'influence d'un champ électrique ou d'un champ magnétique, les rayons γ , étant de même nature que les rayons lumineux ne sont pas déviés ; les rayons α chargés positivement et les rayons β chargés négativement sont déviés en sens inverse (fig. 6).

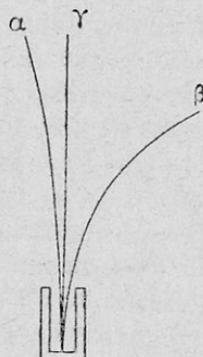


Fig. 6

Recherche et dosage des substances radioactives. — La recherche

et le dosage des substances radioactives sont basés sur leurs propriétés d'émettre des rayons qui rendent les gaz conducteurs. On place la matière radioactive sur le plateau inférieur horizontal d'un condensateur chargé : le condensateur se décharge d'autant plus vite que la substance est plus radioactive. On peut déceler un cinquante millionième de milligramme de radium.

Désintégration des éléments radioactifs. — Le rayonnement des substances radioactives est dû à

(1) Les rayons γ , les rayons X, les rayons ultra-violets, les rayons visibles, les rayons infra-rouges, les ondes hertziennes forment une suite continue d'ondes électromagnétiques, dont les longueurs d'onde vont de quelques dix-millionièmes de micron à quelques myriamètres.

la désintégration de leurs atomes. Un atome de radium, par exemple, se divise en un atome d'hélium et un atome de radon. Les atomes d'hélium, dépouillés chacun de 2 négatons, constituent les rayons α . Quant au radon, c'est un gaz que l'on peut extraire en faisant le vide et qui se liquéfie quand on le fait passer dans un serpentín entouré d'air liquide. Le radium, l'hélium, le radon sont des corps simples. Nous sommes donc en présence d'un phénomène tout nouveau : la division d'un corps simple, le radium, en deux autres corps simples, le radon et l'hélium, c'est-à-dire d'un atome en deux autres atomes.

Energie rayonnée par les substances radioactives. — Quand les rayons α , les rayons β et les rayons γ sont arrêtés en traversant un corps tel que de l'air ou du plomb, l'énergie qu'ils possèdent se transforme en chaleur. Les mesures calorimétriques ont montré qu'une ampoule scellée, contenant 1 gr de radium, dégage 132 calories-gramme par heure. Au bout d'une année, il y a eu dégagement de $132 \times 24 \times 365 = 1,156 \times 10^6$ calories-gramme, tandis qu'il a disparu environ $\frac{1}{2.300}$ gr de radium.

La désintégration d'un gramme de radium est par suite accompagnée d'un dégagement de :

$$\begin{aligned} & 1,156 \times 10^6 \times 2300 = \\ & = 26,5 \times 10^8 \text{ calories-gramme environ,} \end{aligned}$$

c'est-à-dire plus de trois cent mille fois la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un gramme de charbon. La différence d'ordre de grandeur des quantités d'énergie libérées dans les transformations radioactives où il y a transmutation d'éléments et dans les réactions chimiques où les atomes s'unissent sans être détruits, établit une ligne de démarca-

tion parfaitement nette entre les deux sortes de phénomènes. La radioactivité a révélé la prodigieuse réserve d'énergie qui se cache dans les atomes.

La vitesse de désintégration est indépendante des conditions extérieures. — Tandis que la vitesse des réactions chimiques est modifiée par les conditions extérieures et notamment par la température, les transformations radioactives, en raison sans doute de l'énorme libération d'énergie qui les accompagne, sont indépendantes des variations de température que nous pouvons produire et de toutes les conditions que nous pouvons réaliser. La vitesse de désintégration d'un élément radioactif est de plus indépendante de la combinaison où il se trouve engagé : c'est une propriété atomique qui se conserve dans les combinaisons. Le radium, par exemple, se désintègre toujours avec la même vitesse, qu'il soit à -250° ou à $+3.000^{\circ}$, à l'état de métal ou à l'état de sel, sous forme de sel solide ou de sel dissous. Chaque corps radioactif se désintègre avec une vitesse constante qui lui est propre.

Quant aux propriétés chimiques des corps radioactifs, elles ne présentent rien de particulier ; celles du radium ressemblent à celles des métaux alcalino-terreux ; par son inactivité chimique, le radon appartient à la famille des gaz inertes : hélium, néon, argon, krypton et xénon.

Loi des transformations radioactives. — La radioactivité est due aux atomes qui se désintègrent à chaque instant. Le nombre des atomes qui se désintègrent pendant un temps dt est proportionnel au nombre total n des atomes de telle sorte que :

$$(1) \quad -dn = \lambda n dt$$

λ étant une constante propre à l'élément considéré, et ne variant pas au cours du temps.

*La main des Parques blêmes
De vos jours et des miens se joue également*

disait le vieillard aux trois jeunes hommes. Également ? Non, car le pourcentage des vieillards que la mort frappe à chaque heure est plus élevé que celui des hommes dans la force de l'âge. Au contraire, la probabilité pour qu'un atome d'un élément radioactif soit détruit dans un temps donné reste invariable : les atomes ne vieillissent pas.

Pour le radium, si le temps est exprimé en secondes, $\lambda = \frac{1}{72,5 \times 10^9}$ environ, c'est-à-dire qu'il y a par seconde un atome sur 72,5 milliards qui fait explosion. Comme un atome-gramme, soit 226 gr de radium contient $6,02 \times 10^{23}$ atomes, on calcule aisément que dans un milligramme de radium, 36,7 millions d'atomes se désintègrent chaque seconde.

De l'équation (1), on déduit par intégration que si n_0 est le nombre des atomes radioactifs à un instant pris pour origine des temps, au temps t , il n'en reste plus qu'un nombre n , tel que (2) $ne^{\lambda t} = n_0$.

Période des éléments radioactifs. — On a coutume de caractériser un élément radioactif par sa période ; c'est le temps θ nécessaire pour que la moitié d'une certaine masse de cet élément se désintègre. Faisons dans l'équation (2) $n = \frac{n_0}{2}$, t devient θ . L'équation (2) devient $e^{\lambda\theta} = 2$, ou $\lambda\theta = \text{Log } 2$ ou $\lambda\theta = 0,693$. La relation qui relie la période θ à la constante λ est $\theta = \frac{0,693}{\lambda}$. Il est facile de calculer la période quand on a mesuré la constante λ par l'observation de la vitesse de désintégration.

Les périodes des éléments radioactifs sont très différentes : celle du thorium dépasse 10 milliards d'années ; celle du thorium C' est inférieure à un millionième de seconde.

Masses atomiques des éléments radioactifs. — La plupart des éléments radioactifs n'ont pas été obtenus en quantité assez grande pour que leur masse atomique pût être déterminée avec précision. On a mesuré les masses atomiques des plus abondants et on en a déduit celles des autres. Quand la transformation est une transformation α , avec émission d'hélions, comme la masse atomique de l'hélium est 4, la masse atomique de l'élément créé est inférieur de 4 unités à celle de l'élément générateur. Ainsi le radium, dont la masse atomique est 226, donnant naissance à de l'hélium et à du radon, la masse atomique du radon doit être 222, ce qui a été vérifié. Au contraire, quand la transformation est une transformation β , avec émission de négatons, la masse atomique de l'atome créé est à peu près égale à celle de l'atome qui lui a donné naissance, puisque la masse du négaton est très petite.

Séries d'éléments radioactifs. — La période du radium étant de mille cinq cent quatre-vingt-dix ans, le radium aurait depuis longtemps disparu pratiquement de tous les minerais, s'il n'était constamment régénéré à partir d'un élément radioactif de période beaucoup plus longue. Cet élément est l'uranium, dont la période est de 4,6 milliards d'années, et qui donne naissance à une série d'éléments radioactifs dérivant les uns des autres. Le tableau II donne cette série. Chaque élément est représenté par un cercle : le type α ou β de la désintégration est écrit à côté de la flèche qui va de l'élément générateur à l'élément engendré. Un élément se désintègre en

l'élément placé au-dessous de lui et, dans le cas d'une transformation α , en hélium.

L'uranium est accompagné dans ses minerais des éléments qui se sont formés à ses dépens. Ceux dont les périodes sont plus courtes sont en plus faible proportion. Dans un minerai d'uranium, pour une tonne d'uranium il y a 3 dg de radium et 3/100 de milligramme de polonium.

TABLEAU II

Famille de l'uranium

	Symbole	Nom de l'élément	Période	Masse atomique
	U I	Uranium I	$4,6 \times 10^9$ ans	238
	U X ₁	Uranium X ₁	24,5 jours	234
	U X ₂	Uranium X ₂	1,14 minute	234
	U Z	Uranium Z	6,7 heures	234
	U II	Uranium II	$2,7 \cdot 10^5$ ans	234
	Io	Ionium	$8,3 \times 10^4$ ans	230
	Ra	Radium	1.590 ans	226
	Rn	Radon ou Emanation	3,82 jours	222
	Ra A	Radium A	3,05 minutes	218
	Ra B	Radium B	26,8 minutes	214
	Ra C	Radium C	19,7 minutes	214
	Ra C'	Radium C'	$1,5 \cdot 10^{-4}$ seconde	214
	Ra C''	Radium C''	1,32 minute	210
	Ra D	Radium D	22,3 ans	210
	Ra E	Radium E	5,0 jours	210
	Ra F	Radium F ou Polonium	140 jours	210
Ra G	Radium G ou Plomb d'Uranium	Stable	206	

On connaît deux autres séries d'éléments radioactifs : celle de l'actino-uranium et celle du thorium. La figure 7 représente la filiation des trois séries : l'élément créé est écrit au-dessous de l'atome générateur quand la désintégration est du type α , à sa droite, quand elle est du type β . L'analogie d'évolution des trois familles est manifeste. Toutes trois se terminent par un corps qui n'est pas radioactif et qui a les propriétés du plomb. Vers le milieu de chacune d'elles se trouve un gaz inerte : le radon, l'actinon ou le thoron.

On remarquera d'autre part plusieurs bifurcations : le radium C, par exemple, se désintègre dans la proportion de 99,96 % en radium C' et dans la proportion de 0,04 % en radium C''.

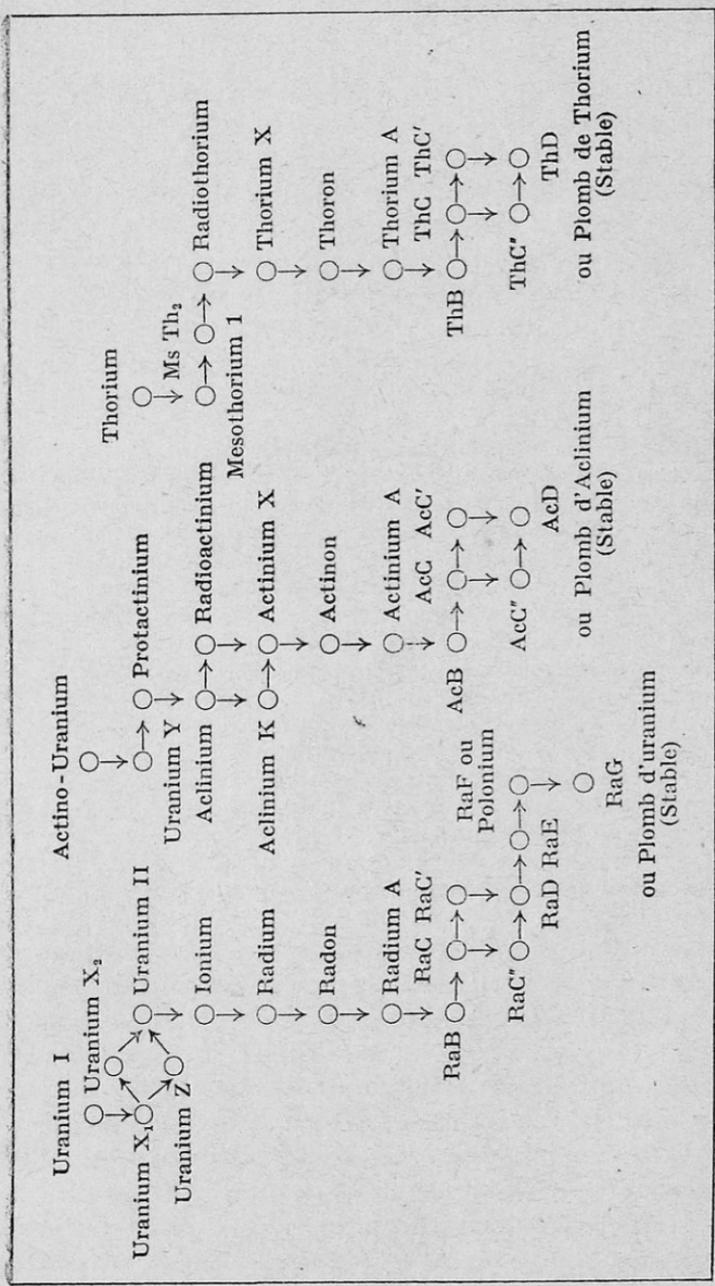


Fig. 7

CHAPITRE II

CONSTITUTION DE L'ATOME

Appareils de détection

Méthode des scintillations. Spinthariscopes. — Le spinthariscopes se compose simplement d'une plaque de verre sur laquelle on a étendu une substance fluorescente — généralement une mince couche de sulfure de zinc — et qui peut être examinée au microscope. Chaque particule électrisée (particules α , ou autres particules dont nous parlerons bientôt : protons, deutons, etc.) produit en arrivant sur la plaque une faible scintillation ; l'écran paraît constellé d'étoiles qui s'éteignent aussitôt après s'être allumées. On peut compter ces petits éclairs et déterminer ainsi le nombre de particules qui se présentent pendant un certain temps ; c'est la première méthode par laquelle on a observé l'action d'une particule isolée.

Il est clair qu'il ne faut pas que les particules arrivant sur l'écran soient trop nombreuses, sans quoi on ne pourrait pas distinguer les scintillations.

Le comptage des scintillations est fatigant pour l'observateur ; aussi cette méthode est peu employée aujourd'hui.

Compteur de Geiger-Müller. — Le compteur de Geiger-Müller (fig. 8) se compose d'un cylindre métallique C dans l'axe duquel est tendu un fil fin F, en acier ou en tungstène. Le cylindre est fermé par deux bouchons isolants dans lesquels passe le fil. On a fait à l'intérieur un vide de l'ordre de $1/10$ d'atmosphère. Entre le cylindre et le fil, on établit une différence de potentiel voisine de celle qui amènerait une décharge. Dès qu'une particule ionisante traverse la paroi du cylindre et pénètre dans le tube, la décharge se produit. Elle est ampli-

fiée par les procédés ordinaires de la T. S. F. ; elle agit ensuite sur un téléphone ou un haut-parleur, de telle sorte qu'il est possible d'entendre le passage d'une seule particule électrisée ; on peut aussi lui faire actionner un numérateur mécanique.

Le compteur de Geiger-Müller décèle, outre les particules électrisées, les rayons X et les rayons γ

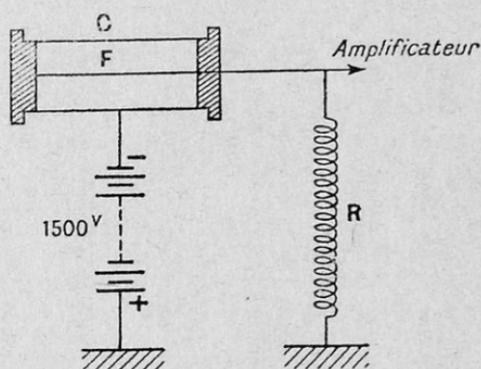


Fig. 8

qui ont, comme nous l'avons vu, la propriété d'ioniser les gaz. Il est utilisé non seulement par les physiciens, mais aussi par les prospecteurs pour la recherche des minerais d'uranium dont il permet « d'entendre » les rayons.

Chambre de Wilson. — Cet appareil, dû au physicien anglais C. T. R. Wilson, est également basé sur l'ionisation des gaz par les particules électrisées en mouvement ou les rayons de faible longueur d'onde (rayons X, rayons γ). Les ions ont la propriété d'être des centres de condensation pour la vapeur d'eau sursaturante, de telle sorte que, lorsqu'une particule électrisée ou un rayon ionisant traverse de l'air sursaturé de vapeur d'eau, il se fait sur son passage une traînée de fines gouttelettes qui dessine sa trajectoire.

L'appareil se compose d'un cylindre en verre le plus souvent vertical (fig. 9); dans ce cylindre peut se mouvoir un piston sur lequel on a déposé une goutte d'eau pour que l'air soit saturé. Un dispositif convenable permet d'abaisser brusquement le piston de façon que la détente produite rende la vapeur sur-saturante. Si, à ce moment, un corpuscule ou un rayon ionisant traverse le gaz, le chapelet des gouttelettes formées apparaît comme un mince fil blanc, qu'un fort éclairage latéral rend très visible et permet de photographier. En prenant des photographies stéréoscopiques, on peut déterminer la forme exacte des trajectoires.

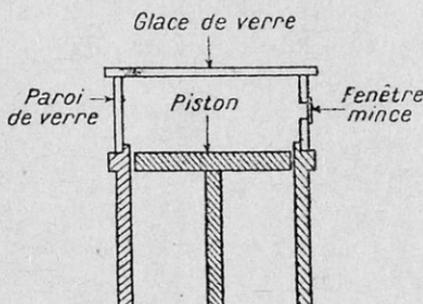


Fig. 9

La chambre de Wilson fournit un moyen d'investigation d'une extrême fécondité.

Plaque photographique (1). — On sait que c'est la plaque photographique qui a permis à Becquerel de découvrir la radioactivité. Après être restée longtemps inutilisée pour l'étude des particules électrisées, elle est devenue un puissant moyen d'investigation en physique nucléaire. Les particules électrisées (hélium, protons, deutons), en mouvement rapide, pénètrent dans l'émulsion, et, après développement, les grains de bromure d'argent qu'elles ont rencontrés, sont réduits à l'état d'argent métallique, de telle sorte que la trajectoire d'une particule est

(1) Voir Raymond CHASTEL, « La plaque photographique au service de la physique nucléaire », Revue Atomes, juin 1948.

matérialisée par une succession de petits grains noirs d'argent. On emploie des émulsions très épaisses (50 à 200 microns), à grains très fins et riches en sel d'argent pour que les grains ne soient pas trop espacés. La longueur des trajectoires n'étant le plus souvent que de quelques dizaines de microns, l'étude des plaques nécessite un appareillage microscopique très précis.

Principaux corpuscules

Electron négatif ou négaton. — Nous connaissons déjà l'électron négatif, ou négaton, grain d'électricité négative, dont la charge est $1,602 \times 10^{-19}$ C. Sauf indication contraire nous prendrons désormais cette charge pour unité. La masse de l'électron est $9,10 \times 10^{-28}$ gr ou 0,000548 u. m. a., en désignant par u. m. a. l'unité de masse atomique, c'est-à-dire la seizième partie de la masse de l'atome d'oxygène.

Hélion. — Nous avons vu (p. 18) que les hélions sont des atomes d'hélium ayant perdu 2 négatons : ils ont ainsi acquis une charge positive égale à 2. La masse de l'atome d'hélium étant 4,003 u. m. a. et celle de l'électron 0,000548 u. m. a., la masse de l'hélion est 4,002 u. m. a.

Proton. — Nous verrons qu'en bombardant certains atomes par des rayons α , on en fait sortir des ions positifs d'hydrogène, c'est-à-dire des atomes d'hydrogène ayant perdu un négaton : on leur a donné le nom de proton, pour marquer le rôle primordial qu'on leur attribue dans la constitution des atomes. La masse de l'atome d'hydrogène étant 1,008 u. m. a. et celle de l'électron 0,000548 u. m. a., la masse du proton est 1,0075 u. m. a. Quant à sa charge électrique, elle est égale et de signe contraire

à celle du négaton, puisque l'atome d'hydrogène est neutre.

Neutron. — En 1930, les physiciens allemands Bothe et Becker, en bombardant par des rayons α des éléments de faible poids atomique, comme le glucinium ou l'aluminium, constatèrent la production de rayons très pénétrants qu'ils prirent pour des rayons γ . A la suite d'importants travaux de M. et Mme Joliot-Curie, le physicien anglais Chadwick montra définitivement que ces rayons sont constitués par des corpuscules dépourvus de charge électrique qu'il appela pour cette raison : neutrons. Les neutrons en mouvement rapide sont extrêmement pénétrants.

La masse du neutron est égale à 1,0089 u. m. a. : elle est donc légèrement supérieure à celle du proton.

Electron positif ou positon. — C'est seulement en 1932 que l'électron positif ou positon a été observé pour la première fois par le physicien américain Anderson. Celui-ci étudiait le passage des rayons cosmiques — ces rayons encore assez mystérieux qui nous viennent des espaces sidéraux — à travers une chambre de Wilson placée dans un champ magnétique puissant. Il constata, à côté des trajectoires de négatons, des trajectoires semblables, mais courbées en sens inverse. L'étude de la particule correspondant à de telles trajectoires a été faite, notamment à Lyon par le Pr Thibaud. Elle a une charge positive égale en valeur absolue à la charge négative du négaton ; elle a la même masse que le négaton : c'est l'électron positif ou positon. Les positons se distinguent des négatons par leur grande rareté ; leur durée de vie est extrêmement courte (de l'ordre du dix-millionième de seconde dans l'air à la pression ordinaire), vraisemblable-

ment parce qu'ils s'unissent aux négatons, infiniment plus nombreux.

Méson. — Le dernier né des corpuscules, je veux dire le plus récemment découvert, est celui qui est appelé mésotron ou mésoton, ou plus souvent aujourd'hui méson. C'est encore l'étude du passage des rayons cosmiques, à travers une chambre de Wilson placée dans un champ magnétique puissant, qui a permis de reconnaître son existence. En 1938, deux physiciens des Etats-Unis, Neddermayer et Anderson, observèrent, à côté des trajectoires des électrons et des protons, les trajectoires d'autres particules qui ne pouvaient être identifiées avec aucune particule connue. Ces particules, dont les unes sont positives et les autres négatives, ont même charge que l'électron. Leur masse est intermédiaire entre celle des électrons et celle des protons, d'où le nom de méson. Leur durée de vie ne dépasse pas 2 ou 3 milliardièmes de seconde. Elles sont extrêmement pénétrantes : en plaçant des écrans en plomb dans la chambre de Wilson, on constate que la courbure de leur trajectoire (et par suite leur énergie cinétique) est très peu modifiée par la traversée de ces écrans.

Les mésons communément observés dans la chambre de Wilson ont une masse qui est de 200 à 220 fois celle de l'électron. D'autres mésons, les mésons π et les mésons σ ont une masse 300 à 330 fois plus grande que celle de l'électron. Récemment, le physicien français Auger (1) et ses collaborateurs ont proposé d'admettre l'existence du méson λ dont la masse est seulement 3 à 10 fois celle de l'électron.

(1) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 12 janvier et 14 février 1948.

L'électron-volt. — L'unité généralement employée pour mesurer l'énergie des corpuscules est l'électron-volt. C'est une quantité d'énergie égale à l'énergie cinétique que possède un électron quand, après avoir été placé au repos dans un champ électrique, il a parcouru sous l'influence du champ l'intervalle séparant deux points dont la différence de potentiel est de 1 V. C'est encore l'énergie qu'il faut dépenser contre les forces électriques pour lui faire faire le chemin inverse. On sait que pour élever de 1 V le potentiel d'une quantité d'électricité égale à 1 coulomb, il faut dépenser 1 J. Comme la charge de l'électron est $1,602 \times 10^{-19}$ C, l'électron-volt vaut $1,602 \times 10^{-19}$ J, soit $1,602 \times 10^{-12}$ ergs. C'est, on le voit, une unité très petite. On emploie souvent son multiple, le mégaélectron-volt, représenté par MeV, qui vaut 1 million d'électron-volts ou $1,602 \times 10^{-6}$ ergs. On calcule aisément que le mégaélectron-volt est équivalent à $4,45 \times 10^{-20}$ kWh ou $3,83 \times 10^{-14}$ calories-gramme.

Structure de l'atome

Modèle de Rutherford. — Le négaton nous est apparu comme un constituant de tous les atomes. Mais, les atomes, étant électriquement neutres, ne peuvent pas être formés uniquement de négatons. Rutherford eut l'idée d'explorer en quelque sorte l'intérieur des atomes en étudiant le passage des rayons α à travers la matière. Nous avons vu (p. 18) que les rayons α peuvent traverser une feuille d'aluminium de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur. Ils ne sont pas sensiblement déviés par leur passage. Le fait qu'un hélion traverse sans être dévié les quelque 100.000 atomes, contenus dans l'épaisseur de la feuille métallique, suggère déjà

l'idée que l'atome présente de grands espaces vides. Cependant on constate que quelques hélions du faisceau subissent une forte déviation.

On a photographié les trajectoires des particules α à travers un gaz, dans la chambre de Wilson ; on a vu que les rayons fortement déviés présentent un coude extrêmement brusque. Ces brusques déviations ne peuvent s'expliquer que si l'hélium, chargé positivement, s'approche d'un centre chargé lui-même positivement et très petit. A la suite de Rutherford, on a été amené à concevoir l'atome comme formé par un noyau très petit, chargé positivement et entouré par les négatons.

Charge du noyau. — L'étude des déviations a même permis de déterminer la charge électrique du

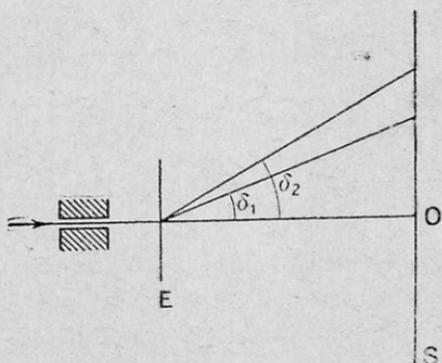


Fig. 10

noyau qui les produit. Rutherford faisait traverser à un étroit faisceau de rayons α une lame métallique E très mince (fig. 10) ; il observait les scintillations sur le spinthariscopie S. Comme il a été dit, la plupart des rayons arrivent sans déviation en O, mais il y a aussi

des scintillations autour du point O. En comptant le nombre des particules α qui sont déviées dans l'angle compris entre δ_1 et δ_2 , on peut calculer la charge des noyaux qui ont produit leur déviation. On a trouvé par cette méthode que, si on prend pour unité de charge électrique la charge de l'électron, la charge du noyau est égale au numéro atomique Z de l'élé-

ment. Le numéro atomique est souvent appelé aujourd'hui nombre de charge.

Nombre des négatons. — Comme l'atome est neutre, la charge négative des négatons est égale à la charge positive du noyau : il s'ensuit que le nombre des négatons est égal au nombre atomique Z de l'élément.

L'atome d'hydrogène n'a qu'un négaton : ce résultat est conforme au fait qu'on n'a jamais pu lui faire acquérir une charge supérieure à un. Son noyau, qui a une charge positive égale à l'unité, est l'ion H^+ , c'est-à-dire le proton.

L'atome d'hélium a 2 négatons. Son noyau, qui a une charge positive égale à 2, est l'hélium.

L'atome d'uranium, qui occupe la dernière place dans la classification de Mendéléeff et a le numéro atomique 92, a 92 négatons.

Répartition des négatons. — Nous avons vu (p. 6) que lorsqu'on range les atomes dans l'ordre de leurs numéros atomiques, beaucoup de leurs propriétés, notamment les propriétés chimiques, présentent un caractère très net de périodicité. On a été ainsi amené à regarder les négatons comme répartis suivant des couches successives, qu'on désigne à partir du noyau par les lettres K, L, M, N, O, P, Q.

La couche K est complète avec les 2 négatons de l'hélium (fig. 11). Le troisième négaton du lithium se place sur la couche L, le lithium a ainsi 2 négatons sur la couche K et un sur la couche L. Le dernier élément de la seconde période, le néon, a 2 électrons sur la couche K et 8 sur la couche L. Avec l'atome de sodium commence la couche M. L'atome de sodium a 2 négatons sur la couche K, 8 sur la couche L et 1 sur la couche M.

Si on admet que l'atome entre en relations avec

les autres atomes par ses négatons superficiels et que, par suite, c'est surtout la couche superficielle des négatons qui détermine les propriétés chimiques, on comprend aisément en regardant la figure 11 que les éléments d'une même colonne ont des propriétés chimiques semblables.

La couche N commence avec le premier élément

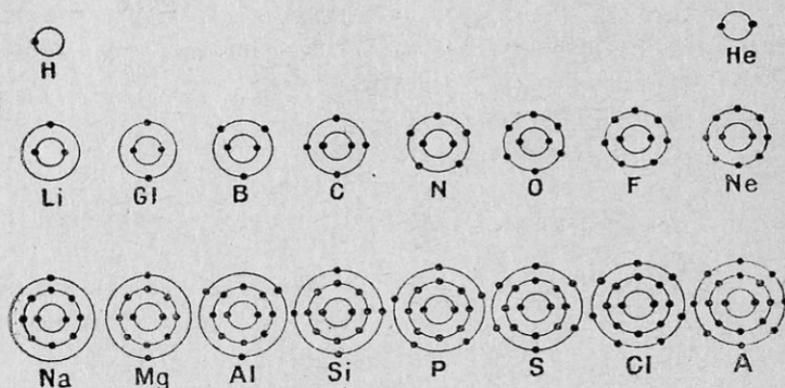


Fig. 11. — Répartition des négatons dans les atomes des 18 premiers éléments

de la quatrième période, le potassium. Dans cette période et dans les suivantes, les négatons successifs, au lieu de se placer tous sur la couche externe, passent souvent sur la couche sous-jacente.

Mouvement des négatons. — Le noyau étant chargé positivement, les négatons se précipiteraient sur lui s'ils n'étaient retenus par une force antagoniste. Rutherford, prenant pour modèle le système solaire, suivant une idée émise par Jean Perrin, adopta l'hypothèse que, de même que les planètes tournent autour du soleil, les négatons tournent dans l'atome autour du noyau, la force centrifuge ainsi créée faisant équilibre à l'attraction électrostatique,

Atome de Bohr et de Sommerfeld. — D'après les

lois de l'électromagnétisme, le négaton doit, en décrivant son orbite, émettre des ondes électromagnétiques. Il doit par conséquent perdre son énergie cinétique et tomber sur le noyau. De plus, le spectre émis par l'atome devrait être continu.

A ces graves difficultés soulevées par l'atome de Rutherford, le physicien danois Bohr proposa une solution hardie. D'après sa théorie :

1° Les négatons ne peuvent se mouvoir que sur certaines orbites privilégiées formant une suite discontinue ;

2° En décrivant une de ces orbites un négaton n'émet pas d'énergie rayonnante ;

3° Le négaton émet ou absorbe de l'énergie lorsqu'il passe par un saut brusque d'une orbite privilégiée à une autre ;

4° Si W est l'énergie libérée ou absorbée par le négaton dans ce saut, la fréquence ν du rayonnement émis ou absorbé est donnée par la relation

$$(1) W = h\nu$$

h étant une constante universelle appelée constante de Planck, dont la valeur est

$$h = 6,62 \times 10^{-27} \text{ erg-seconde}$$

Puisque le mouvement du négaton sur son orbite ne s'amortit pas, chaque orbite correspond à un niveau d'énergie mesuré par le travail qu'il faudrait dépenser pour extraire de l'atome un négaton situé sur cette orbite. Ce travail est beaucoup plus grand pour les négatons voisins du noyau que pour les négatons extérieurs ; pour les électrons des couches voisines du noyau, il est d'autant plus grand qu'il y a plus de couches autour d'elles, c'est-à-dire que le numéro atomique de l'élément est plus élevé. Ainsi pour les négatons extérieurs, l'énergie d'extraction

n'est que de quelques électron-volts, tandis qu'elle est de quelques centaines d'électron-volts pour un négaton des couches profondes du carbone ou de l'oxygène et de l'ordre de 100.000 électron-volts pour les négatons les plus voisins du noyau du plomb ou du mercure. Il résulte de là et de la relation (1) que la fréquence de la radiation est d'autant plus grande qu'elle est produite par la perturbation de négatons placés plus près du noyau. Les radiations lumineuses proviennent des couches externes de négatons : ce qui explique le caractère de périodicité de leurs spectres ; les rayons X proviennent des couches profondes : c'est pourquoi leurs spectres en montrent aucun caractère de périodicité, mais révèlent un plan général pour tous les atomes.

L'atome de Bohr, dans lequel les orbites décrites par des négatons sont des cercles, s'est révélé insuffisant pour expliquer complètement les spectres des éléments les plus simples. Sommerfeld a été conduit à émettre l'hypothèse que les orbites des négatons sont des ellipses comme celles des planètes, le noyau occupant un des foyers de l'ellipse. De plus le négaton possède comme une planète un mouvement de rotation sur lui-même.

Composition du noyau. — On admet aujourd'hui que le noyau est formé de protons et de neutrons : les protons et les neutrons portent le nom général de nucléons.

Soit Z le nombre atomique ou nombre de charge de l'atome. La charge du proton étant égale à l'unité, le nombre des protons qui se trouvent dans le noyau est égal au nombre de charge Z .

Nous verrons bientôt que la masse d'un atome exprimée en u. m. a. est très voisine d'un nombre entier qu'on appelle son nombre de masse. La masse de l'atome provient presque uniquement de son

noyau puisque la masse d'un électron n'est que la mille huit cent trente-sixième partie de la masse de l'atome d'hydrogène. Comme la masse du proton et celle du neutron sont très voisines de l'unité u. m. a. (p. 30 et 31), la somme du nombre Z des protons et du nombre N des neutrons est égale au nombre de masse A de l'atome. $Z + N = A$. Donc $N = A - Z$. Le nombre des neutrons est la différence entre le nombre de masse de l'atome et son nombre de charge.

Sous diverses influences, l'atome peut perdre une partie de ses négatons et passer à l'état d'ion positif ; il revient ensuite facilement à son état primitif en fixant des négatons. C'est le noyau qui régit les négatons ; c'est dans le noyau que réside la personnalité de l'atome.

Le noyau de l'atome d'hydrogène est le seul qui ne contienne pas de neutron. L'atome d'hélium ayant un nombre de charge égal à 2 et une masse égale à 4, son noyau renferme 2 protons et $4 - 2 = 2$ neutrons. L'émission de particules α dans de nombreuses transformations radioactives incite à penser que les hélions existent tout formés dans les noyaux des atomes.

Dimensions de l'atome et de son noyau. — L'exploration des atomes par des hélions ou par des protons, animés de grandes vitesses, a permis de déterminer les dimensions de leurs noyaux. Le rayon du noyau est de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-12} cm, c'est-à-dire de un dix-millième à un millième de milliardième de centimètre, tandis que le rayon de l'atome est de l'ordre de 10^{-8} cm, c'est-à-dire d'un cent millionième de centimètre. On voit que le rayon du noyau est de dix mille à cent mille fois plus petit que celui de l'atome : l'atome est presque entièrement vide. « Même dans la substance la plus compacte, or ou

platine par exemple, les noyaux sont si prodigieusement espacés que pour un grossissement atteignant dix fois le trillion, ils apparaîtraient tout au plus comme des ballons d'enfants, placés à plusieurs kilomètres les uns des autres, entre lesquels, en un vide absolu, quelques bulles de savon identiques pourraient figurer ces électrons légers dont les orbites rigides imposent à la substance son volume apparent. » (Jean Perrin.) « Si l'on amassait tous les noyaux et électrons qui constituent toutes les molécules d'un être humain, sans qu'il y ait de place perdue, on obtiendrait une petite sphère à peine visible au microscope. » (F. Joliot.)

Puisque les noyaux sont très petits et que presque toute la masse de l'atome est concentrée dans le noyau, la densité du noyau doit être prodigieusement élevée. On connaît des étoiles dont la densité moyenne est deux mille fois celle du platine. Il est vraisemblable que par suite de la température qui y règne (plusieurs millions de degrés), leurs atomes se déplacent si rapidement (1) que, dans leurs chocs, ils perdent la plupart de leurs négatons et qu'ainsi dépouillés ils sont beaucoup plus rapprochés les uns des autres.

Propriétés qui dépendent des négatons et propriétés qui dépendent du noyau. — Les réactions chimiques sont dues à des déplacements de négatons : cession de négatons par un atome à un autre atome ou mise en commun de négatons entre deux atomes ; elles laissent le noyau intact. La couleur des objets, l'émission des rayons lumineux et des rayons X, etc., sont également dues aux négatons.

(1) On sait que les molécules des fluides, et, à haute température, les atomes qui résultent de la dissociation des molécules, sont animés de mouvements d'autant plus rapides que la température est plus élevée.

Du noyau dépendent les phénomènes de radioactivité et de transmutation.

Matière, corps simples, corpuscules. — Nos sens nous permettent de percevoir une multitude d'objets différant par leur couleur, leur densité, leur ténacité, etc. Les chimistes du XVIII^e et du XIX^e siècle ont réduit ces objets innombrables à quatre-vingt-douze corps simples ou éléments qui forment toutes les substances connues. La science est maintenant allée beaucoup plus loin : il n'y a plus que quelques corpuscules, négatons, protons, neutrons, placés dans un vide absolu qui occupe presque tout l'espace. La merveilleuse richesse de la nature vient des arrangements de ces particules et des mouvements dont elles sont animées.

A côté de ces théories mécanistes qui, selon la pensée de Descartes, expliquent les données de l'expérience par des figures et des mouvements, se sont développées les théories beaucoup plus abstraites de la mécanique ondulatoire ; nous en dirons seulement quelques mots. Voyons d'abord les théories relatives à la lumière.

Grains de lumière ou photons. — Au commencement du XVIII^e siècle, Newton a admis que la production de lumière vient de l'émission de particules se propageant en ligne droite : la théorie de l'émission a été abandonnée un siècle plus tard parce qu'elle ne pouvait expliquer les phénomènes d'interférence et de diffraction. Elle a été remplacée par la théorie des ondulations, selon laquelle les radiations sont dues à la propagation d'un mouvement vibratoire. Après avoir gardé la faveur des physiciens pendant tout le XIX^e siècle, la théorie des ondulations a été à son tour impuissante à expliquer tous les faits quand, au début du XX^e siècle, on a reconnu que, dans certains phénomènes, la lumière

présente, comme la matière et l'électricité, un caractère discontinu. C'est ainsi que dans le phénomène photoélectrique, la vitesse des négatons arrachés par la lumière à la matière ne dépend que de la fréquence des radiations ; pour des radiations monochromatiques, elle est indépendante de l'intensité de la lumière ; si cette intensité devient plus faible, le nombre des négatons diminue, mais leur vitesse reste la même. Ce fait paraît incompatible avec la répartition uniforme de l'énergie lumineuse sur une surface d'onde. Puisque dans le choc d'une lumière monochromatique contre la matière, des énergies lumineuses de valeur fixe sont absorbées en des points de plus en plus rares à mesure qu'on s'éloigne de la source, on doit admettre que des grains d'énergie identiques sont transportés par cette lumière monochromatique. Ces grains d'énergie qui constituent les radiations ont reçu le nom de photons. L'énergie w d'un photon est $w = h\nu$, ν étant la fréquence de la radiation et h la constante de Planck (p. 37).

Les radiations se présentent ainsi avec un double caractère : corpusculaire quand on envisage leurs échanges d'énergie avec la matière, ondulatoire quand on considère les interférences, la diffraction, etc.

Mécanique ondulatoire. — Le savant français Louis de Broglie a eu l'intuition géniale que tout corpuscule projectile s'entoure d'ondes associées à son mouvement ; la longueur d'onde est

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

m étant la masse du corpuscule, v sa vitesse et h la constante de Planck. Les orbites privilégiées de Bohr-Sommerfeld s'expliquent par la nécessité que l'onde, après avoir fait un tour complet, se retrouve dans le même état vibratoire pour que son régime soit stable.

Les conceptions de Louis de Broglie ont été le point de départ de la Mécanique ondulatoire. On ne cherche plus à déterminer d'une façon précise la trajectoire du négaton. D'une manière générale, la Mécanique ondulatoire renonce aux modèles pour considérer « des Formes mathématiques... où l'esprit sent confusément l'expression de propriétés physiques profondément différentes des propriétés saisissables par nos sens » (1).

Les isotopes

Isotopes radioactifs. — Beaucoup d'éléments radioactifs ont une vie trop courte pour qu'il soit possible d'étudier leurs propriétés. Leurs places dans la classification périodique sont déterminées par les deux lois de Soddy et Fajans :

Lorsqu'un élément radioactif se désintègre avec émission de rayons α , l'élément auquel il donne naissance a un nombre atomique inférieur de 2 unités à celui de l'élément primitif.

Lorsqu'un élément radioactif se désintègre avec émission des rayon β , le nouvel élément a un nombre atomique supérieur d'une unité à celui de l'élément primitif.

Ces deux règles sont en accord avec ce que nous avons vu de la constitution de l'atome. La particule α , étant un noyau d'hélium, a une charge de 2 unités : son départ diminue de 2 unités le nombre atomique, puisque celui-ci est égal à la charge du noyau. La particule β est un négaton expulsé par le noyau : elle provient de la transformation d'un neutron en proton. Son départ augmente d'une unité la charge du noyau, par suite le nombre atomique.

Il résulte immédiatement des lois de Soddy et Fajans que lorsqu'une transformation α et deux

(1) Jean PERRIN, *Grains de matière et de lumière*.

transformations β se succèdent, l'élément primitif et l'élément final ont le même nombre atomique, c'est-à-dire la même place dans la classification périodique : c'est ce qui a lieu par exemple pour l'uranium I et l'uranium II. Des éléments qui ont la même place dans la classification périodique sont appelés isotopes. L'importance de la notion d'isotopie a beaucoup augmenté lorsque J. J. Thomson a montré qu'elle doit être étendue aux éléments non radioactifs.

Spectroscopie de masse. — J. J. Thomson fit passer un mince faisceau de rayons positifs d'abord entre les pôles d'un électroaimant E (fig. 12), puis entre les armatures B d'un condensateur prolongeant les pôles isolés électriquement. Le faisceau

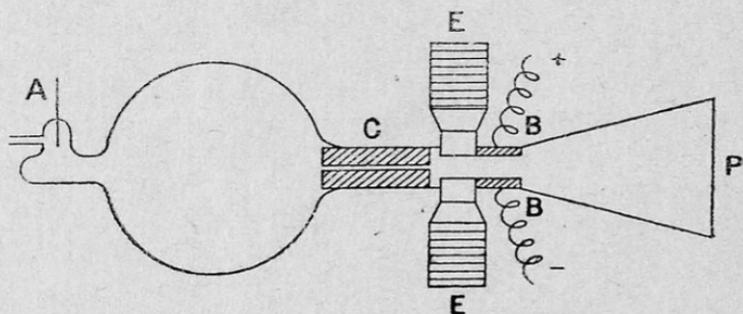


Fig. 12

était ensuite reçu sur une plaque photographique P normale à sa direction primitive.

Considérons une particule électrisée du faisceau de rayons : elle est soumise à un champ électrique et à un champ magnétique perpendiculaires à la direction qu'elle suit et parallèles entre eux. Soit O le point où elle rencontrerait l'écran si elle n'était pas déviée (fig. 13). D'après ce qui a été vu p. 10,

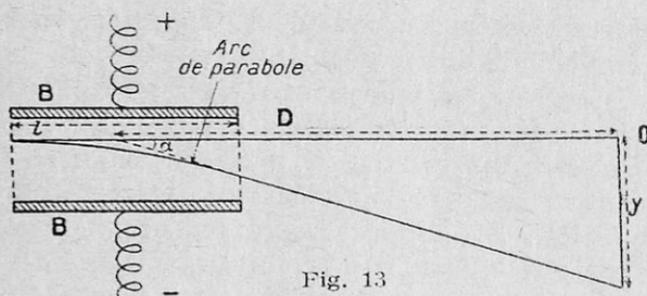


Fig. 13

son point d'arrivée sur l'écran est écarté de O par le champ électrique, suivant l'axe oy, parallèle à la direction du champ, d'une longueur :

$$y = D \operatorname{tg} \alpha \quad \text{ou}$$

$$(1) \quad y = \frac{1}{v^2} \frac{e}{m} H D$$

v étant sa vitesse, e sa charge, m sa masse et H l'intensité du champ électrique.

Le champ magnétique d'intensité \mathcal{H} lui fait décrire un arc de circonférence ; lorsqu'elle échappe à son influence, elle continue son chemin en ligne droite et son point d'arrivée sur l'écran est écarté de O sui-

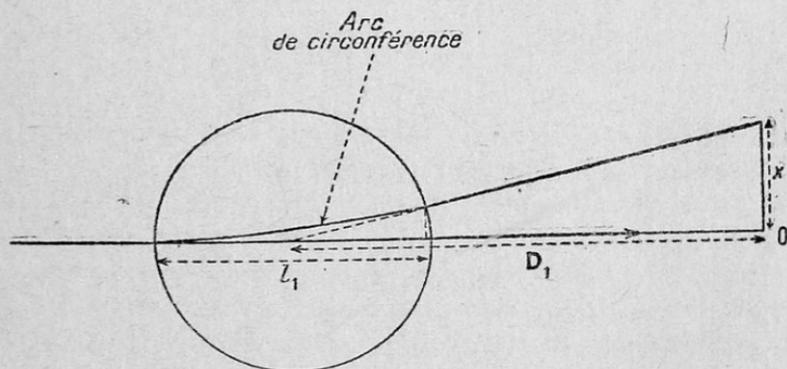


Fig. 14

vant ox (fig. 14) perpendiculaire à oy d'une longueur :

$$(2) \quad x = \frac{1}{v} \frac{e}{m} \mathcal{H} l_1 D_1$$

Nous avons vu p. 10 que dans le cas d'un faisceau de rayons cathodiques, tous les électrons du faisceau ont la même vitesse ; au contraire, les particules qui constituent un faisceau de rayons positifs n'ont pas la même vitesse ; les valeurs de x et de y qui leur correspondent varient et le faisceau est étalé. Éliminons v entre (1) et (2) ; il vient :

$$(3) \quad x^2 = \frac{\mathcal{H}^2 l_1^2 D_1^2}{H^2 D} \frac{e}{m} y$$

équation qui, pour une valeur déterminée de $\frac{e}{m}$, présente une parabole d'axe oy et de sommet O . Les points où les ions positifs de même charge spécifique $\frac{e}{m}$ viennent impressionner la plaque photographique forment un arc de parabole. Si le faisceau de rayons positifs contient des ions correspondant à plusieurs valeurs de $\frac{e}{m}$, on observe sur la plaque photographique des courbes appartenant à plusieurs paraboles distinctes. J. J. Thomson a ainsi trouvé que le néon est formé de deux sortes d'atomes.

Un autre physicien anglais, Aston a perfectionné la méthode de J. J. Thomson. Il fait passer le mince faisceau de rayons positifs (fig. 15) d'abord dans un champ électrique perpendiculaire à sa direction, puis dans un champ magnétique perpendiculaire à la fois à la direction du champ électrique et à celle du faisceau. Les deux champs produisent des déviations de sens

contraires ; en leur donnant des intensités convenables, on obtient sur la plaque photographique P une petite droite pour chaque sorte d'atome. L'ensemble de ces droites, pour les différents atomes qui forment l'élément, a l'aspect d'un spectre. Aston lui a donné le nom de spectre de masse et l'appareil est appelé spectroscopie de masse.

De la position de chaque raie on déduit la masse de l'atome correspondant. Le dernier spectrographe de masse d'Aston permet de mesurer la masse des atomes avec une approximation d'au moins $\frac{1}{10.000}$. De

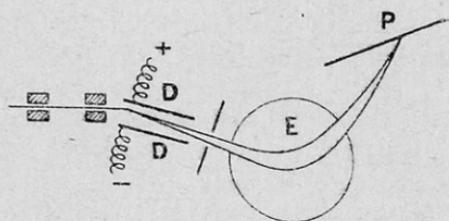


Fig. 15

plus, en comparant les intensités des raies, on peut déterminer les proportions des divers isotopes.

Isotopes stables. — La plupart des éléments ont été trouvés être des mélanges d'isotopes. Les masses des atomes des différents isotopes, exprimées en u. m. a., sont très voisines de nombres entiers ; ceux-ci ont reçu le nom de nombres de masse ou nombres massiques ; les masses exactes sont appelées masses isotopiques.

Tandis qu'on ne trouve dans la nature que 92 éléments, le nombre des isotopes naturels dépasse 300. Certains éléments, particulièrement les éléments de nombre atomique moyen ou élevé, ont un grand nombre d'isotopes : l'étain en a 10 ; le cadmium, le xénon et le mercure en ont chacun 9.

Quant aux proportions des isotopes, elles diffèrent beaucoup suivant les éléments : les 3 isotopes

de l'hydrogène sont en proportions très inégales : 99,98 %, 0,02 % et 0,00000007 % ; les 2 isotopes de brome se trouvent à peu près dans la même proportion : 50,6 % et 49,4 %.

Structure des isotopes. — Puisque les isotopes d'un élément ont le même numéro atomique, ils ont le même nombre de négatons autour du noyau ; les noyaux renferment le même nombre de protons ; ils diffèrent par leurs nombres de neutrons.

Ainsi, les 3 isotopes de l'oxygène, ayant le nombre atomique 8, ont tous les trois 8 négatons. Leurs noyaux contiennent chacun 8 protons. Mais, comme ils ont respectivement pour nombres de masse 16, 17 et 18, le noyau de l'un contient 8 neutrons, le noyau du deuxième 9 neutrons, celui du troisième 10 neutrons.

Symbole représentatif de l'atome. — Sauf pour l'hydrogène et pour les éléments radioactifs, on attribue le même nom et aussi le même symbole — qui est le symbole chimique usuel — à tous les isotopes d'un élément. On écrit à gauche du symbole : en bas le nombre atomique, en haut le nombre massique. Les 3 isotopes de l'oxygène, par exemple, sont représentés par ${}^8_{16}\text{O}$, ${}^8_{17}\text{O}$, ${}^8_{18}\text{O}$. Le côté droit du symbole est réservé pour indiquer, dans les formules des corps composés, le nombre d'atomes contenus dans la molécule.

Propriétés des isotopes. — Comme 2 isotopes n'ont pas le même noyau, l'un d'eux peut être radioactif tandis que l'autre est stable. Au contraire, les couches électroniques étant les mêmes, les propriétés qui en dépendent sont semblables ; en particulier, les propriétés chimiques de 2 isotopes sont très voisines. Cependant, les vitesses de réaction peuvent être inégales. Par exemple, l'isotope de

l'hydrogène qui a été appelé deutérium et qui est représenté par le symbole ${}^2_1\text{D}$ se combine à peu près six fois moins vite avec le brome et deux fois moins vite avec l'iode que ${}^1_1\text{H}$. Une « réaction d'échange » peut avoir lieu entre 2 isotopes qui font partie de composés différents ou qui sont l'un libre et l'autre combiné. Ainsi, lorsque de l'hydrogène est en contact avec de l'eau, soit liquide, soit gazeuse, une réaction d'échange (qui peut être accélérée par des catalyseurs) se produit entre les isotopes de l'hydrogène libre et ceux de l'hydrogène de l'eau. L'équilibre établi, la proportion de deutérium est trois à quatre fois plus grande dans l'hydrogène de l'eau que dans l'hydrogène libre.

Séparation des isotopes en quantités pondérables.

— Si la séparation effectuée par le spectrographe d'Aston est complète, elle ne porte que sur des quantités de matière extrêmement petites. Comment séparer les isotopes en quantités pondérables ?

Les propriétés chimiques conviennent mal, en général, puisqu'elles sont sensiblement les mêmes pour tous les isotopes d'un élément. On fait surtout appel aux propriétés qui dépendent de la masse de l'atome. Parmi les méthodes qui donnent de bons résultats, signalons la diffusion d'un gaz à travers les très petits orifices d'une paroi poreuse : les diverses molécules diffusent avec des vitesses inversement proportionnelles aux racines carrées de leurs poids. Ce procédé a permis d'obtenir l'isotope du néon ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ à l'état pur.

La diffusion thermique (basée sur le fait que, s'il y a des inégalités de température dans un mélange gazeux, certaines molécules tendent à se concentrer dans les régions froides, d'autres dans les régions

chaudes), la centrifugation, la distillation fractionnée, les réactions d'échange ont été également utilisées.

Toutes ces méthodes sont fort laborieuses, ce qui s'explique parce que les poids atomiques des isotopes sont très voisins. Dans la plupart des cas, elles n'ont permis d'obtenir au laboratoire que des séparations partielles, même après de longues et fastidieuses opérations.

Cependant, comme le deutérium ${}^2_1\text{D}$ a une masse sensiblement double de celle de ${}^1_1\text{H}$, son isolement est relativement aisé. (On peut négliger le troisième isotope de l'hydrogène dont la proportion est extrêmement faible : 0,00000007 %.) Le procédé qui donne les meilleurs résultats paraît être l'électrolyse d'une solution de soude : la proportion de l'isotope ${}^2_1\text{D}$ va en croissant dans la solution ; en utilisant ce fait, on a pu obtenir l'eau lourde ${}^2_1\text{D}_2\text{O}$.

<i>Propriétés physiques de</i>	H_2O	et de	${}^2_1\text{D}_2\text{O}$
Densités à 20° C.....	0,9982		1,1056
Temp. de fusion	0° C		3°,82 C
Temp. d'ébullition sous la pression atmos- phérique	100° C		101°,42 C
Temp. du max. de den- sité	4°,0 C		11°,6 C

En décomposant l'eau lourde par le fer ou le magnésium, on obtient le deutérium, qui a d'ailleurs été isolé directement par d'autres méthodes.

Constance de la proportion des isotopes. — Des déterminations précises de poids atomiques ont été

faites sur des éléments contenus dans des minerais provenant de contrées éloignées, de couches géologiques différentes et même d'aérolithes. Elles ont presque toujours donné pour un même élément, formé de plusieurs isotopes, des résultats concordant aux erreurs d'expérience près. On doit en conclure que la proportion des isotopes formant un élément est invariable.

Il est vraisemblable que dans la nébuleuse primitive, les éléments ont subi un brassage tel que leur composition a été rendue partout uniforme; les réactions qui se sont produites dans la suite ne l'ont pas modifiée d'une façon appréciable en raison de la similitude des propriétés chimiques des isotopes.

Cependant, puisque les isotopes peuvent subir des fractionnements au laboratoire, on est amené à penser qu'un faible fractionnement peut aussi se produire dans les phénomènes naturels, particulièrement pour les isotopes de l'hydrogène. On a en effet trouvé de légères variations dans la proportion des isotopes de l'hydrogène: l'eau de la Mer Morte est un peu plus riche en eau lourde que les autres eaux naturelles; de même, l'eau qui se trouve dans les profondeurs des mers contient un peu plus d'eau lourde que celle des couches supérieures; mais les différences sont très petites.

Les isotopes radioactifs peuvent se trouver séparés. — Les isotopes radioactifs se sont formés à une époque relativement récente et continuent à se former: ceux qui appartiennent à deux lignées différentes peuvent se trouver séparés dans les minerais. Les derniers termes des trois séries sont des isotopes de plomb qui se rencontrent séparés. Tandis que le poids atomique du plomb ordinaire, mélange en proportion constante des divers isotopes, est 207,21, celui du plomb extrait des minerais d'uranium est

voisin de 206 et celui du plomb extrait des minerais de thorium est voisin de 208.

Notion d'élément. — Avant la découverte des isotopes, on regardait les corps simples comme constitués par une seule espèce d'atomes. La masse atomique était la masse de l'atome.

Nous savons aujourd'hui que la réalité est différente : la plupart des éléments sont des mélanges d'isotopes. Il serait rationnel de considérer chaque isotope comme un élément, puisque à chaque isotope correspond un atome distinct. Cependant, on a préféré jusqu'ici garder les habitudes acquises et on continue à donner le nom d'élément à un mélange d'isotopes. Il y a ainsi deux sortes d'éléments. Quelques éléments sont constitués par des atomes tous identiques ; leur masse atomique représente la masse de cet atome exprimé en u. m. a. Les autres, qui sont la grande majorité, sont des mélanges d'isotopes ; leur masse atomique n'est plus la masse d'un atome déterminé ; elle se déduit des masses des atomes des divers isotopes d'après les proportions suivant lesquelles ceux-ci sont mélangés.

Comme il a été dit précédemment (p. 48), pour ne pas compliquer la nomenclature, on attribue le même nom aux isotopes d'un même élément. Une exception a cependant été faite pour les isotopes radioactifs qui se trouvent séparés dans la nature, et pour les 3 isotopes de l'hydrogène. Le plus abondant de ceux-ci est ${}^1_1\text{H}$ (proportion 99,98 %), son noyau est le proton ; un autre a été appelé deutérium (proportion 0,02 %) et est représenté par le symbole ${}^2_1\text{D}$; son noyau est le deutéron ou deuton ; le troisième est le tritium ${}^3_1\text{T}$ (proportion 0,000 00007 %) ; son noyau est le triton.

Base des poids atomiques. — Les chimistes ont fixé les masses atomiques en attribuant par convention la masse atomique 16 à l'oxygène naturel, mélange des 3 isotopes. Avec le spectrographe de masse on mesure la masse de chaque isotope ; c'est pourquoi Aston a attribué la masse atomique 16 non au mélange des 3 isotopes, mais à l'isotope le plus abondant qui est représenté par $^{16}_8\text{O}$, tandis que les deux autres sont $^{17}_8\text{O}$ et $^{18}_8\text{O}$. Les masses atomiques sont donc un peu plus grandes dans le système physique que dans le système chimique : le facteur de conversion est 1,00027. Les nombres que nous avons donnés jusqu'ici sont ceux du système chimique.

CHAPITRE III

TRANSMUTATIONS D'ÉLÉMENTS ÉNERGÉTIQUE NUCLÉAIRE

Transmutation d'éléments

Transmutations par les particules α . — La première transmutation d'un élément stable fut réalisée en 1919 par Rutherford. L'appareil qu'il employa était d'une grande simplicité. Il se composait (fig. 16) d'un tube de verre muni de tubulures et de robinets permettant de le remplir d'un gaz pur. Grâce à une tige métallique T, on pouvait déplacer dans l'axe du cylindre un petit grain G de polonium, substance très radioactive émettant des rayons α . La plaque P

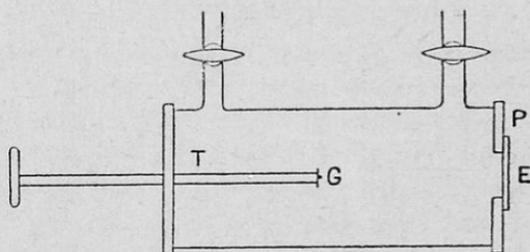


Fig. 16

fermant le cylindre à l'extrémité opposée comprenait un écran E au sulfure de zinc. Après avoir rempli le tube d'azote pur et sec, Rutherford observa que, tandis que les particules α émises par le polonium s'arrêtent dans un gaz sous la pression atmos-

phérique après un parcours d'environ 3 cm, il se produisait encore des scintillations sur l'écran E quand il était distant du polonium de 40 cm. Il put montrer que ces scintillations étaient dues à des protons émis par les atomes d'azote sous l'action des particules α .

L'expérience de Rutherford a été rendue plus frappante par la photographie de la trajectoire des particules dans la chambre de Wilson. En faisant un grand nombre de photographies, on en observe quelques-unes sur lesquelles la trajectoire d'une particule α prend la forme d'une fourche à trois branches (fig. 17). La branche inférieure correspond à la particule α incidente ; une branche longue et fine, sans rapport avec la direction de la particule α incidente, correspond au proton projeté ; la troisième branche, courte et épaisse, est la trajectoire du noyau restant. On n'observe aucune trace de la particule α après le choc : il faut admettre qu'elle s'incorpore au noyau et que celui-ci expulse ensuite un proton.

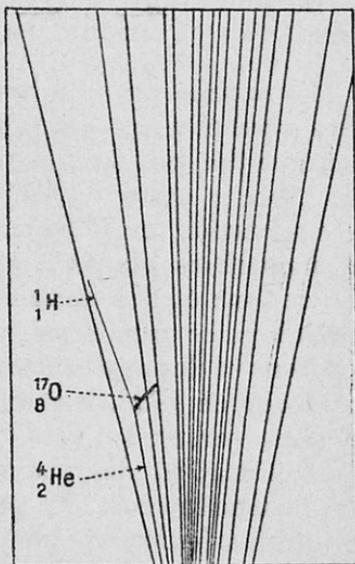
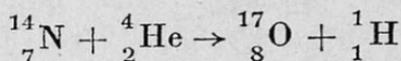


Fig. 17

Le nombre de charge de l'atome d'azote est 7. La charge du noyau a été augmentée de 2 unités par incorporation de la particule α et diminuée d'une unité par expulsion du proton. Le nouveau noyau a pour charge : $7 + 2 - 1 = 8$. C'est par

suite le noyau d'un des isotopes de l'oxygène.

Le nombre de masse de l'atome d'azote est 14, c'est-à-dire que la somme du nombre des protons et du nombre des neutrons contenus dans son noyau est 14. L'addition d'une particule α augmente le nombre de masse de 4 unités, puisqu'une particule α est formée de 2 protons et de 2 neutrons ; le départ d'un proton le diminue d'une unité. Le nouvel atome a pour nombre de masse $14 + 4 - 1 = 17$. C'est l'isotope de l'oxygène $^{17}_8\text{O}$. La réaction de transmutation doit être formulée :



La somme des nombres placés à gauche et en bas des symboles dans le premier membre est égale à la somme des nombres correspondants dans le second membre : cette égalité traduit le principe de la conservation de l'électricité. De même les sommes des nombres placés à gauche et en haut des symboles sont égales dans le premier et dans le second membre, ce qui exprime que le nombre total des protons et des neutrons ne varie pas dans la réaction.

Jusqu'en 1932, les rayons α des substances radioactives furent les seuls projectiles utilisés pour la transmutation des atomes. Ils permirent d'obtenir la transmutation de tous les éléments de faible nombre atomique jusqu'au calcium, à l'exception de l'hélium, du carbone et de l'oxygène qui présentent, comme nous le verrons, une stabilité particulière.

Le rendement de ces transmutations est très faible. Dans l'expérience de Rutherford, l'azote étant sous la pression atmosphérique, c'est à peine si une particule α sur trente mille rencontre un noyau d'azote. Ce résultat ne doit pas surprendre, étant donné l'extrême petitesse des noyaux : bombarder

des noyaux d'azote avec des particules α , c'est tirer au hasard dans la nuit sur des oiseaux séparés par des kilomètres.

On est parvenu à accroître le rendement des transmutations en augmentant la densité de l'arrosage en projectiles.

Particules accélérées artificiellement. — Les préparations les plus radioactives que l'on ait obtenues n'émettent qu'un nombre de particules α de l'ordre de 20 milliards par seconde, correspondant à un courant inférieur à 1/100 de microampère. Les sources d'ions que l'on réalise aujourd'hui permettent, avec des ions d'hydrogène, de deutérium ou d'hélium d'obtenir des courants de l'ordre du milliampère, c'est-à-dire cent mille fois plus intenses. On utilise ces ions comme projectiles capables de produire des transmutations en leur communiquant une énergie cinétique suffisante pour vaincre les répulsions coulombiennes que leur opposent les noyaux. La barrière de potentiel qui défend le noyau est d'autant plus difficile à franchir que le noyau a une charge électrique plus grande : ainsi s'explique que les rayons α des substances radioactives n'aient permis de transmuter que les éléments de faible numéro atomique.

Cyclotron. — Le procédé, par lequel on communique aux protons, aux deutons ou aux hélions une grande vitesse, consiste à les soumettre à l'action d'un champ électrique. Les appareils employés dans ce but sont de divers types ; celui qui permet de faire acquérir aux ions la plus grande énergie cinétique porte le nom de cyclotron. Il a été mis au point de 1930 à 1936 par le Pr Lawrence de l'Université de Berkeley (Californie). Dans cet appareil, on donne au corpuscule non une impulsion unique, mais une série d'impulsions successives et on enroule

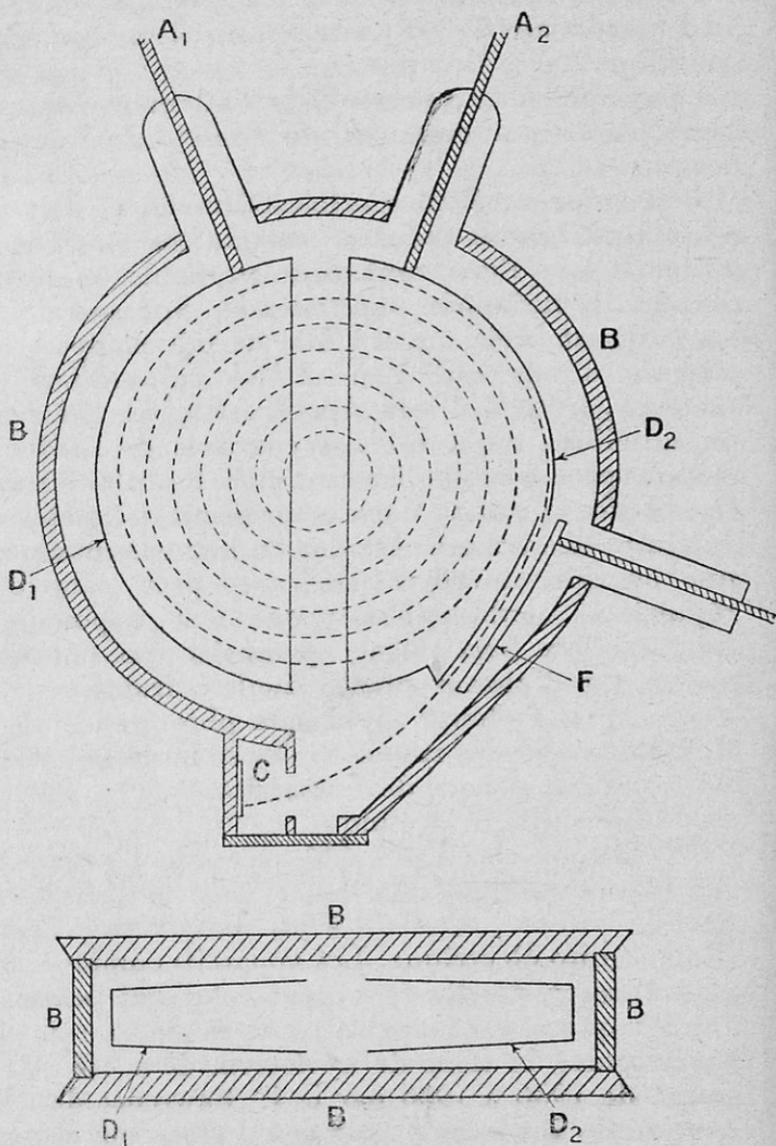


Fig. 18

sa trajectoire au moyen d'un champ magnétique.

Un cyclotron (fig. 18) se compose d'un électroaimant dont les pièces polaires se terminent par des surfaces planes et horizontales entre lesquelles se trouve placée une boîte cylindrique B, en laiton par exemple, où on peut réaliser un vide poussé. La boîte B contient 2 électrodes, D_1 et D_2 en cuivre, semi-cylindriques, creuses, semblables aux deux moitiés d'une boîte cylindrique plate coupée suivant un de ses plans diamétraux. A cause de sa ressemblance avec un D majuscule, chacune des 2 électrodes est appelée un dee, nom anglais de la consonne D. Les 2 électrodes D_1 et D_2 sont soigneusement isolées l'une de l'autre et isolées aussi de la boîte qui les contient. Chacune d'elles est reliée à une des bornes A_1 ou A_2 d'un générateur électrique de haute fréquence. Au centre de la boîte se trouve un dispositif producteur d'ions.

Considérons l'un de ces ions. Le champ magnétique courbe sa trajectoire de façon à lui faire décrire une circonférence de rayon R tel que

$$(1) \frac{1}{R} = \frac{1}{v} \frac{e}{m} \mathcal{H}, \quad v \text{ étant la vitesse de la particule,}$$

e sa charge, m sa masse et \mathcal{H} l'intensité du champ magnétique (p. 10). Le temps que met la particule pour parcourir la moitié de la circonférence, c'est-à-

dire une longueur πR est (2) $t = \frac{\pi R}{v}$. Des équations (1) et (2) on tire (3) $t = \pi \frac{m}{e} \frac{1}{\mathcal{H}}$; pour une par-

ticule donnée et un champ magnétique fixe, t est indépendant de la vitesse de la particule. Si la vitesse augmente, la particule décrit une circonférence plus grande et la durée d'une demi-rotation reste la même.

On règle l'intensité \mathcal{H} du champ magnétique de façon que le temps nécessaire à la particule pour décrire une demi-circonférence soit égal à la demi-période de la tension alternative des dees. Un ion, entrant dans le dee D_1 y décrit une demi-circonférence d'un mouvement uniforme, car, comme il n'y a pas de champ électrique dans un conducteur creux et vide, son mouvement à l'intérieur du dee n'est pas influencé par le changement de signe du potentiel du dee. Au moment où l'ion passe du dee D_1 dans le dee D_2 , le dee D_1 a un potentiel positif, le dee D_2 a un potentiel négatif et leur différence de potentiel est maximum. L'ion subit une accélération ; l'augmentation de son énergie cinétique est de l'ordre de 50.000 à 100.000 électron-volts. Dans le dee D_2 , l'ion décrit une circonférence plus grande, d'un mouvement uniforme, avec une vitesse plus grande. Quand il sort du dee D_2 pour entrer à nouveau dans le dee D_1 , c'est le dee D_2 qui est devenu positif et le dee D_1 négatif. Il subit une nouvelle accélération et il parcourt dans D_1 une circonférence de rayon encore accru. Il décrit ainsi une spirale représentée sur la figure 18 en pointillé. Après avoir subi quelques centaines d'impulsions et parcouru quelques centaines de mètres en un temps de l'ordre de quelques cent millièmes de seconde, il arrive à proximité d'une électrode auxiliaire F appelée déflecteur ; sous l'influence du champ électrique transversal créé par cette électrode, il est dévié et pénètre dans le canal déflecteur pour arriver dans une petite chambre auxiliaire C où se trouve l'élément à bombarder.

Les dispositifs de commande et de surveillance sont placés sur un tableau, séparé du cyclotron par un mur d'eau d'au moins 1 m d'épaisseur, de façon que l'opérateur soit protégé contre les rayonnements dangereux.

Pour que l'énergie finale du corpuscule soit aussi élevée que possible, on doit lui appliquer un grand nombre d'impulsions, c'est-à-dire lui faire faire un grand nombre de tours dans le champ magnétique, ce qui a conduit à construire des électroaimants géants. Par un singulier contraste, on a construit d'énormes machines pour lancer des corpuscules dont le poids est de l'ordre du milliardième de milliardième de microgramme.

Les plus grands cyclotrons peuvent fournir des hélions ayant une énergie cinétique de 30 MeV avec une intensité de courant d'un demi-milliampère.

L'énergie cinétique des particules est limitée par la variation de leur masse. D'après la loi d'Einstein, en effet (p. 77), la masse d'un projectile en mouvement est plus grande que sa masse au repos. La for-

mule (3) $t = \pi \frac{m}{e} \frac{1}{\mathcal{E}}$ montre que le temps, mis par la

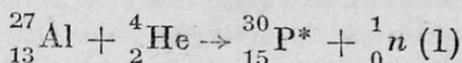
particule pour parcourir une demi-circonférence, augmente avec la masse m ; à partir de 20 MeV, la différence entre ce temps et la demi-période de la tension alternative devient sensible. On peut rétablir le synchronisme en augmentant la période de la tension alternative lorsque les particules sont à la fin de leur course. L'appareil modifié porte le nom de *synchrocyclotron*. Le synchrocyclotron de Berkeley donne des hélions de 400 MeV, avec une intensité de courant d'un demi-microampère.

Les rayons α naturels les plus pénétrants ont une énergie cinétique qui ne dépasse pas 8 MeV et leur débit est au plus un centième de microampère ; on voit combien on gagne avec le cyclotron et le synchrocyclotron.

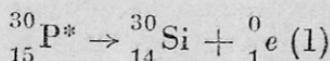
Radioactivité artificielle. — Les atomes provenant des transmutations sont-ils stables ou radioactifs ?

Jusqu'en 1934, on n'obtint par transmutation que des éléments stables. En 1934, M. et Mme Joliot-Curie firent la découverte de la radioactivité artificielle. Ayant irradié une feuille d'aluminium avec les rayons α d'une forte source de polonium, ils constatèrent que la feuille d'aluminium, après avoir été soustraite au bombardement des particules α , continue à émettre un rayonnement : ce rayonnement, que l'on peut observer soit avec un compteur, soit avec la chambre de Wilson, est constitué par des positons ; il décroît suivant une loi exponentielle, comme celui des substances radioactives naturelles. M. et Mme Joliot-Curie conclurent : « Nous sommes en présence de radioéléments nouveaux et d'un nouveau type de radioactivité. »

L'aspect de la feuille d'aluminium ne change pas, car une très faible proportion de ses atomes sont atteints par les projectiles α : ils sont transformés, avec émission de neutrons, en un isotope du phosphore qui n'existe pas dans la nature et qui, étant radioactif, a été appelé radiophosphore.



(Selon l'usage, nous plaçons une étoile en haut et à droite du symbole P pour indiquer qu'il représente un corps radioactif.) La période du radiophosphore est de 2 mn 55 s. Il se désintègre, avec émission de positons, en un atome de silicium stable :



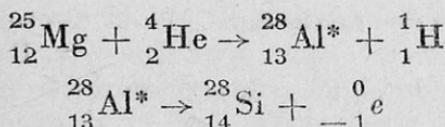
(1) Nous représentons le neutron par ${}_0^1n$, le positon par ${}_1^0e$, le négaton par ${}_{-1}^0e$.

Bien que le radiophosphore soit en très petite quantité, M. et Mme Joliot-Curie purent avoir un contrôle chimique de son existence. En dissolvant la mince feuille d'aluminium dans l'acide chlorhydrique, ils constatèrent que la solution formée était inactive : la radioactivité était passée dans les produits gazeux. L'aluminium donne en effet du chlorure d'aluminium et de l'hydrogène, tandis que le phosphore donne de l'hydrogène phosphoré qui se dégage entraîné par l'hydrogène.

Un autre procédé consiste à dissoudre la feuille d'aluminium irradiée dans un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique, qui transforme le phosphore en acide phosphorique ; on ajoute ensuite une petite quantité d'une solution de phosphate de sodium et un peu d'une solution d'un sel de zirconium ; il se forme un précipité de phosphate de zirconium qui entraîne l'acide phosphorique et par suite la radioactivité.

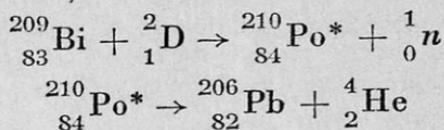
Ce sont là des procédés généraux employés pour caractériser les substances radioactives artificielles. Comme on ne dispose que de quantités très faibles de ces substances, on les sépare en les entraînant, dans un gaz ou un précipité, par un corps non radioactif.

Dans d'autres cas, le radioélément formé se désintègre avec émission de négatons. Citons à titre d'exemple la réaction suivante, également découverte par M. et Mme Joliot-Curie :



Enfin, l'élément radioactif formé peut se désintégrer avec émission d'hélions. C'est ce qui se produit quand du bismuth donne du polonium, subs-

tance radioactive qui existe dans la nature et qui se désintègre en donnant du plomb d'uranium et de l'hélium (p. 24).

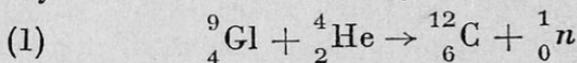


Les deux derniers exemples montrent que les radioéléments artificiels et les éléments radioactifs naturels ne sont pas de types essentiellement différents.

Bombardements par neutrons. — L'agent de transmutation le plus efficace est le neutron : cela se comprend aisément, car le neutron, n'ayant pas de charge électrique, n'est pas arrêté par la barrière de potentiel que les noyaux opposent aux particules chargées.

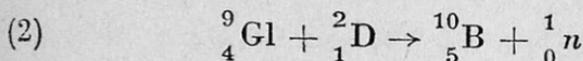
En se servant des neutrons comme agents de bombardement, le physicien italien Fermi et ses élèves ont obtenu un grand nombre de radioéléments nouveaux, pour la plupart négatogènes. Parmi les éléments qui, sous l'influence des neutrons, se transforment en radioéléments avec émission de négatons, citons l'aluminium, le silicium, le phosphore, l'arsenic, l'argent, l'iridium. Un compteur de Geiger-Müller dont la paroi cylindrique est en argent, manifeste la présence de neutrons par les décharges que déterminent les négatons émis par l'argent sous l'influence des neutrons.

Production des neutrons. — Nous avons vu (p. 31) que les neutrons sont produits par l'action des rayons α sur un élément léger comme le glucinium :



Le plus souvent on met dans une ampoule de verre un mélange aussi homogène que possible de

glucinium en poudre fine et d'un sel de radium. On peut obtenir une production de neutrons beaucoup plus abondante en bombardant le glucinium par un flux intense de deutons accélérés artificiellement :



Les neutrons émis par ces deux réactions sont animés de grandes vitesses, se rapprochant de celle de la lumière ; leur énergie cinétique se chiffre par millions d'électron-volts : on leur donne le nom de neutrons rapides. Ils ont un grand pouvoir de pénétration, car, étant insensibles à l'action des champs électriques qui existent à l'intérieur des atomes, ils poursuivent leur chemin tant qu'ils ne rencontrent pas un noyau.

Ralentissement des neutrons. — Lorsqu'un corpuscule heurte un noyau, il ne s'y incorpore pas toujours : le choc peut être semblable à celui de deux boules parfaitement élastiques. Dans un choc élastique contre un noyau lourd, le neutron rebondit et sa vitesse n'est que peu diminuée ; au contraire, s'il rencontre un noyau léger, il lui communique la plus grande partie de son énergie cinétique, comme une boule de billard qui frappe une boule de même grosseur. Les neutrons qui traversent une substance contenant des atomes légers (par exemple l'eau ou la paraffine qui contiennent des atomes d'hydrogène) perdent ainsi la plus grande partie de leur vitesse et se transforment en neutrons lents.

Quand l'énergie cinétique des neutrons a été abaissée jusqu'à n'être qu'une petite fraction d'électron-volt, ils prennent la même énergie cinétique que les molécules auxquelles ils se heurtent : ils portent alors le nom de neutrons thermiques.

Propriétés des neutrons lents. — Les neutrons

lents sont en général beaucoup plus efficaces que les neutrons rapides pour la production des radioéléments. Fermi a constaté, par exemple, que si on interpose de l'eau ou de la paraffine entre une ampoule productrice de neutrons et une lame d'argent, la radioactivité que manifeste la lame est fortement augmentée.

Ayant une faible vitesse, les neutrons lents restent plus longtemps au voisinage des noyaux et subissent plus longtemps leur influence : de là vient sans doute qu'ils sont plus efficaces. Il semble se produire des phénomènes de résonance entre les neutrons lents et les noyaux à proximité desquels ils passent, chaque élément étant surtout sensible à des neutrons d'énergie cinétique déterminée.

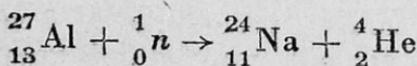
En raison même de leur action sur les noyaux, les neutrons lents n'ont pas le pouvoir de pénétration des neutrons rapides. Mais ils sont très inégalement absorbés par les divers éléments ; tandis qu'ils peuvent traverser plusieurs centimètres de plomb, une lame de cadmium d'un demi-millimètre d'épaisseur suffit à les arrêter. Un écran contenant par centimètre carré 4 mg de bore, soit libre, soit combiné, les arrête à peu près complètement. Les expérimentateurs se protègent contre le rayonnement très dangereux des neutrons en interposant sur leur passage des blocs de paraffine recouverts d'acide borique : la paraffine les ralentit et ils sont ensuite absorbés par le bore.

Résultat des transmutations. — En bombardant les noyaux soit avec les hélions émis par les substances radioactives naturelles, soit avec des protons, des deutons ou des hélions accélérés artificiellement, soit avec des neutrons, on a obtenu des réactions de transmutation de tous les éléments. Le nombre des réactions nucléaires étudiées dépasse

six cent cinquante. Leur résultat le plus fréquent est la formation d'un élément radioactif ; on connaît aujourd'hui plus de quatre cents radioéléments artificiels ; tous les éléments ont au moins un isotope radioactif.

Un même atome peut subir des transmutations diverses suivant le corpuscule qui sert d'agent de bombardement ; pour un même corpuscule, la transmutation peut varier suivant l'énergie cinétique du corpuscule. Bohr a admis que le noyau, ayant absorbé la particule incidente, forme avec elle un système instable, dont la durée est très courte, mais est cependant beaucoup plus grande que celle qui serait nécessaire à la particule incidente pour traverser le noyau si elle n'était pas ralentie.

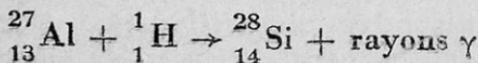
Le plus souvent le système instable émet une particule autre que la particule incorporée, de telle sorte que le nouveau noyau est différent du noyau primitif. Citons par exemple la réaction :



Le nouvel élément peut être un isotope de l'élément primitif ; exemple :

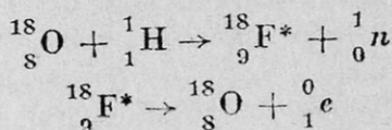


Quelquefois le noyau instable n'émet pas de particule, mais subit un réarrangement intérieur qui se traduit par émission de rayons γ ; exemple :



Il peut arriver que le système instable donne naissance à un élément radioactif qui se désintègre

en redonnant l'élément stable primitif. C'est ce qui se produit dans les réactions :



Les deux réactions ont en définitive pour résultat la transformation d'un proton en un neutron et un positon. D'autres réactions ont pour résultat la transformation d'un neutron en un proton et un négaton.

En résumé, s'il n'a pas été possible jusqu'ici de former des éléments avec les particules ultimes : neutrons, négatons, protons, il a été créé par transmutation un grand nombre d'éléments nouveaux, les uns stables, la plupart radioactifs.

Éléments transuraniens. — On a même pu prolonger la série des éléments au delà de l'uranium qui est dans le tableau périodique le dernier élément naturel. On connaît aujourd'hui quatre éléments transuraniens. L'élément de nombre atomique 93 a été appelé neptunium et l'élément 94, plutonium, parce que la planète Neptune est plus éloignée du soleil que la planète Uranus et que la planète Pluton est encore plus éloignée. L'élément 95 a été baptisé americium ; l'élément 96 curium.

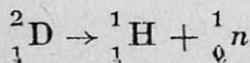
Applications des radioéléments. — On sait que les rayons X sont utilisés dans le traitement du cancer, ainsi que le radium qui émet (p. 18) des rayons α , des rayons β et des rayons γ . Les neutrons ont une action analogue, mais non identique à celle de ces rayons ; il est probable que la neutronthérapie entrera dans la pratique médicale.

Le radiophosphore ${}^{32}_{25}\text{P}^*$ dont la période est de

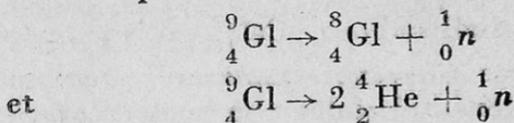
14,5 jours est déjà utilisé dans les cas de leucémie. Le radiosodium $^{24}_{11}\text{Na}^*$, dont la période est de 14,8 heures et le radiocouvre $^{64}_{29}\text{Cu}^*$ dont la période est de 12,8 heures peuvent remplacer le radium dans ses applications médicales : on peut en fabriquer avec le cyclotron des quantités équivalentes à plusieurs grammes de radium.

Les radioéléments sont d'autre part de précieux indicateurs en chimie et en biologie. Ajoutons à un élément ordinaire, libre ou combiné, une petite quantité d'un de ses isotopes radioactifs : celui-ci le suivra dans toutes ses réactions et le rendra par son rayonnement facile à déceler. C'est ainsi qu'on a pu suivre le phosphore dans l'organisme en le mélangeant avec des traces de radiophosphore. La quantité de radioélément nécessaire pour « étiqueter » l'élément normal est extrêmement faible : il suffit d'un atome radioactif pour 100 milliards d'atomes normaux.

Transmutations par les photons. — Nous avons vu (p. 11) que lorsque la lumière frappe les atomes, elle peut en arracher des négatons. D'après la relation $w = h\nu$ (p. 42), l'énergie w d'un photon est d'autant plus élevée que la fréquence ν est plus grande. A mesure que l'énergie des photons augmente, ils peuvent arracher des négatons plus profonds. Il était naturel de penser que les photons de grande énergie des rayons γ seraient capables de produire des transmutations nucléaires. L'expérience a vérifié cette prévision. C'est ainsi que les photons des rayons γ du thorium C' provoquent la décomposition du noyau de deutérium en un proton et un neutron :



Ils produisent aussi la transmutation du glucinium d'après les réactions :



Matérialisation et dématérialisation. — Dans les photodésintégrations dont il vient d'être parlé, le photon disparaît sans laisser de trace : seule, l'énergie qu'il a apportée se retrouve dans le bilan énergétique de la réaction. M. et Mme Joliot-Curie et plusieurs physiciens étrangers ont montré qu'un photon d'énergie suffisante peut se matérialiser en donnant naissance à un positon et à un négaton. La figure 19 représente le dispositif expérimental employé par M. et Mme Joliot-Curie. Il comprend une chambre de Wilson C placée dans un champ magnétique et pourvue d'une ouverture que l'on peut fermer au moyen d'un écran E, en plomb par exemple. Un autre écran en plomb P beaucoup plus épais protège la chambre contre les rayonnements parasites. Ayant disposé devant l'écran E une parcelle S de thorium C'' qui émet des photons γ d'énergie égale à 2,62 MeV, on constate qu'il

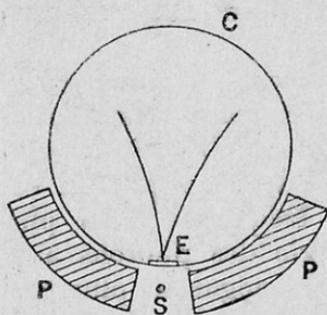


Fig. 19

apparaît dans la chambre de Wilson, outre les trajectoires des négatons arrachés à l'écran E par les photons γ , des trajectoires de « paires » dont chacune est formée d'un positon et d'un négaton. L'énergie cinétique d'une paire peut être mesurée par la courbure des trajectoires (p. 10) ; on constate qu'elle est

d'environ 1,60 MeV, donc inférieure d'un MeV à celle du photon. Or la masse du négaton (p. 30) est de $9,10 \times 10^{-28}$ gr, ce qui correspond sensiblement à 0,5 MeV d'après l'équation d'Einstein (1). La masse de la paire correspond par suite à environ $0,5 \times 2 = 1$ MeV ; c'est précisément la valeur de l'énergie disparue ; la partie de l'énergie du photon qui a disparu s'est transformée en un positon et un négaton.

Inversement, une paire peut disparaître en engendrant de la lumière. Les physiciens français, Joliot et Thibaud ont montré en même temps, quoique indépendamment l'un de l'autre, que si on envoie des positons sur un écran, en platine par exemple, chaque « paire » formée par un de ces positons et par un négaton des atomes de l'écran, se transforme en deux photons ayant chacun une énergie de $\frac{1}{2}$ MeV.

L'énergie des deux photons, égale à 1 MeV, correspond à la masse de la « paire » évanouie. Il y a dématérialisation des électrons.

Pulvérisation des noyaux. — Les physiciens de Berkeley ont annoncé que sous l'influence des particules α de 400 MeV produites par leur synchrocyclotron, les noyaux lourds se brisent en plusieurs fragments, donnant ainsi naissance à des noyaux plus légers.

Le physicien français Leprince-Ringuet et ses collaborateurs viennent d'obtenir des résultats non moins intéressants avec les rayons cosmiques (2). En employant la technique des émulsions photographiques spéciales, ils ont pu constater la désintégration complète, sous l'influence des rayons cos-

(1) Voir page 76, *L'énergie et la masse*.

(2) LEPRINCE-RINGUET, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 10 décembre 1947 et *Revue Atomes*, mars 1948,

miques, d'un noyau d'argent en hélium, protons et tritons. Ainsi, si l'on n'a pu encore former des noyaux avec les particules élémentaires, on est arrivé à décomposer un noyau lourd en ces particules.

Production de mésons (1). — En exposant des plaques photographiques spéciales (p. 29) à haute altitude, les physiciens de l'École de Bristol ont observé des désintégrations de noyaux par les mésons : la masse du méson se transforme en énergie et le noyau où a pénétré le méson, ainsi excité, se désintègre. Dans les mêmes plaques, ces physiciens ont observé l'émission de mésons par les noyaux des émulsions. Les mésons du rayonnement cosmique sont produits par le choc des particules primaires de ce rayonnement, vraisemblablement des protons, contre les noyaux d'oxygène et d'azote de la haute atmosphère ; il y a création de particules matérielles, les mésons, à partir de l'énergie cinétique des protons ; donc matérialisation de cette énergie.

Jusqu'à ces derniers temps, il n'avait pas été possible de produire artificiellement des mésons. La production artificielle des mésons a été obtenue récemment à Berkeley par deux jeunes physiciens, dont l'un, le Brésilien Lattès, s'était initié à Bristol à la technique des émulsions photographiques spéciales. Ils ont lancé contre une cible de carbone (ou de glucinium, ou de cuivre, ou d'uranium) des particules α auxquelles ils avaient communiqué avec le synchrocyclotron de Berkeley, une énergie cinétique de 380 MeV : les mésons se forment dans les collisions entre les nucléons des particules α et les nucléons de la cible ; ils sont reçus dans une émulsion.

(1) Lire : « La production artificielle des mésons », par LEPRINCERINGUET, Revue *Atomes*, juin 1948.

sion photographique où ils sont ensuite décelés par leurs traces. Le nombre des mésons formés est très grand : on obtient 10 millions de fois plus de mésons dans une expérience de quelques minutes que dans l'exposition d'une plaque à haute altitude pendant un mois. Mais ce nombre diminue très vite quand l'énergie des particules α diminue ; il devient nul quand elle descend au-dessous de 300 MeV.

Ces expériences, très importantes pour la connaissance des interactions entre les nucléons, auront peut-être aussi des applications pratiques ; si l'on parvient à produire des faisceaux assez concentrés et assez intenses de mésons doués d'une grande énergie cinétique, il sera possible, en dirigeant un de ces faisceaux sur un objet matériel éloigné, de provoquer des désintégrations de noyaux avec transformation de mésons en énergie, et ainsi de libérer de l'énergie à distance.

Énergétique nucléaire

Stabilité des noyaux. — La stabilité des noyaux dépend des forces qui s'y exercent entre protons et protons, neutrons et neutrons, protons et neutrons. Un noyau ne peut pas être formé d'un nombre quelconque de neutrons et de protons. Le rapport du nombre N des neutrons au nombre Z des protons qui lui sont associés ne varie que dans d'étroites limites. Égal à 1 dans le deuton, il reste voisin de 1 pour les éléments légers stables et s'élève à mesure que le nombre atomique augmente, jusqu'à près de 1,6 pour l'uranium $^{238}_{92}\text{U}$. Si on porte en abscisses le nombre Z des protons et en ordonnées le nombre N des neutrons contenus dans le noyau (fig. 20), l'espace occupé par les atomes n'est qu'une mince

bande du plan ; la ligne médiane de cette bande est d'abord à peu près parallèle à la bissectrice des deux axes, puis elle se relève de plus en plus.

La figure 20 est limitée à $Z = 24$ et $N = 31$. Les atomes stables sont représentés par un cercle \circ ; les atomes radioactifs par le symbole \ominus s'ils émettent des négatons, par le symbole \oplus s'ils émettent des positons.

Les atomes qui se trouvent sur une même ligne verticale sont des isotopes d'un même élément.

L'examen de la figure montre que les radioéléments négatogènes sont au-dessus des atomes stables : ce sont les isotopes les plus lourds. Leurs noyaux renferment trop de neutrons : un neutron émet un négaton et se transforme ainsi en proton, ce qui rétablit la stabilité. Au contraire, les radioéléments positogènes sont au-dessous des atomes stables : ce sont les isotopes les plus légers. Leurs noyaux ne renferment pas assez de neutrons par rapport au nombre des protons : un proton émet un positon et se transforme en un neutron, ce qui rétablit encore la stabilité.

Le caractère pair ou impair de Z et de N exerce aussi une grande influence sur la stabilité. Parmi les atomes pour lesquels Z et N sont pairs, 85 % sont stables. Parmi ceux pour lesquels un de ces nombres est pair et l'autre impair, il y a à peu près autant d'éléments radioactifs que d'éléments stables. Enfin, presque tous les atomes qui présentent des valeurs impaires de Z et de N sont radioactifs ; dans cette catégorie, seuls sont stables quelques atomes légers.

Abondance relative des éléments naturels. — La lithosphère (c'est-à-dire la croûte terrestre et l'atmosphère) est surtout formée d'éléments légers : les atomes dont le nombre de masse ne dépasse pas

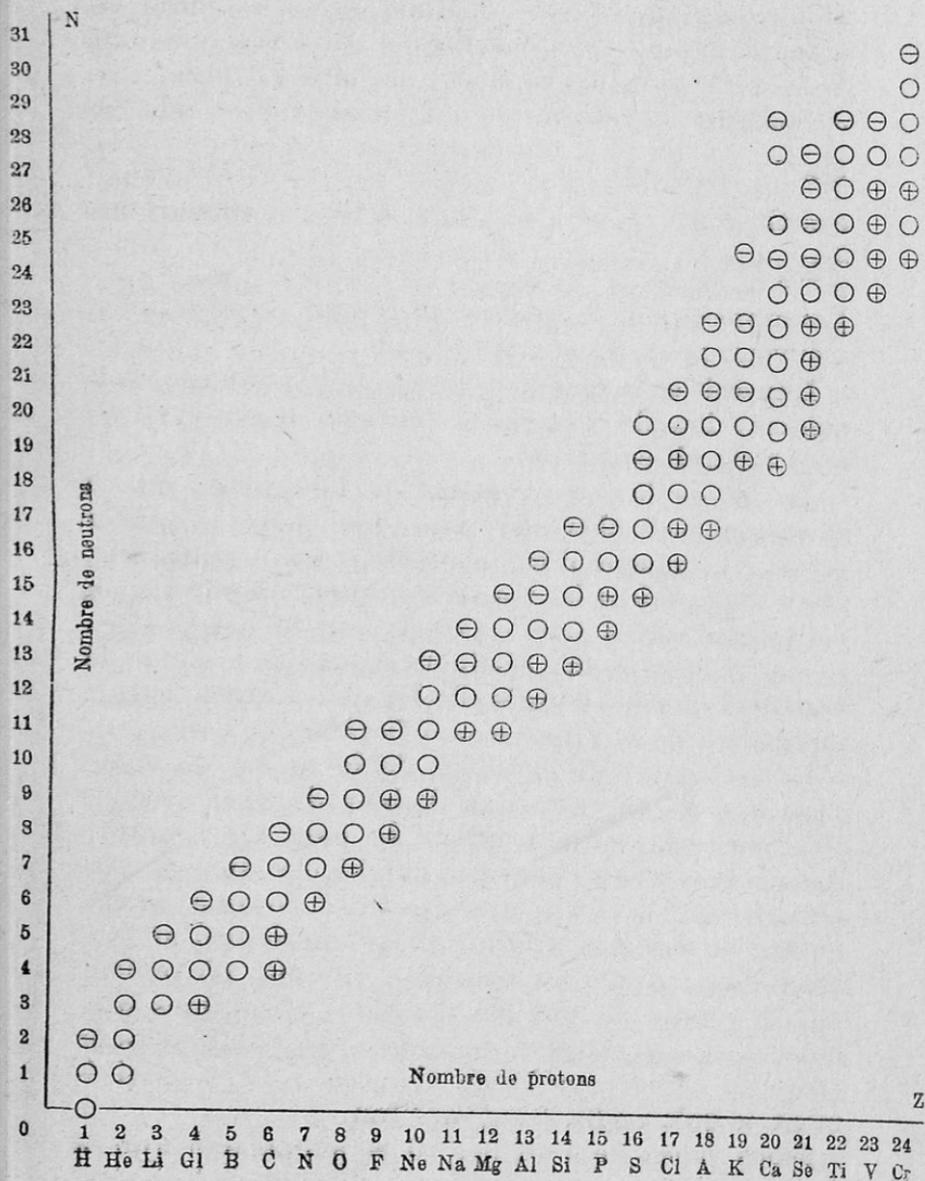


Fig. 20

65 forment plus de 99 % de sa masse. Les atomes, pour lesquels Z et N sont tous deux pairs constituent 86 % de la lithosphère. Il y a lieu d'autre part de remarquer l'abondance des atomes dont le nombre de masse est un multiple de 4 : l'oxygène $^{16}_8\text{O}$ constitue 47 % de la lithosphère, le magnésium $^{24}_{12}\text{Mg}$ 2 %, le silicium $^{28}_{14}\text{Si}$ 28 %, le fer $^{56}_{26}\text{Fe}$ 5 %. Les atomes pour lesquels Z et N sont impairs ne se trouvent qu'en proportion infime.

L'énergie et la masse. — D'après le principe de la conservation de l'énergie, l'énergie d'un système isolé resterait constante.

La loi de la conservation de la masse, due à Lavoisier, est plus ancienne. On peut l'énoncer ainsi : la masse d'un système reste invariable, quelles que soient les transformations physiques ou chimiques subies par les corps qui le composent. Cette loi établit une distinction complète entre la masse et l'énergie ; d'après elle, les variations d'énergie qu'éprouve un système ne modifieraient pas sa masse.

La loi de la conservation de la masse dans les réactions chimiques a fait l'objet de vérifications très précises, notamment de la part de Landolt. Aucune variation de masse supérieure aux erreurs d'expérience n'a pu être observée comme conséquence de réactions chimiques à l'intérieur d'un système. Cependant, les résultats obtenus n'excluent pas la possibilité que les réactions chimiques produisent des variations de masse trop faibles pour être constatées expérimentalement : c'est précisément ce qu'on admet aujourd'hui.

Nous avons déjà vu (p. 70 et suivantes) que la matière peut se transformer en énergie et l'énergie en matière,

D'après la loi d'Einstein, la masse d'un ensemble de corps dont l'énergie varie, s'accroît d'une quantité égale au quotient de l'augmentation d'énergie par le carré de la vitesse de la lumière :

$$\Delta m = \frac{\Delta U}{c^2}$$

Δm étant l'accroissement de masse, ΔU l'accroissement d'énergie et c la vitesse de la lumière. Dans le système d'unités CGS,

$$(2) \quad \Delta m \text{ gr} = \frac{\Delta U \text{ ergs}}{8,986 \times 10^{20}}$$

soit, très sensiblement :

$$\Delta m \text{ gr} = \frac{\Delta U \text{ ergs}}{9 \times 10^{20}}$$

Envisageons une réaction très exothermique, par exemple la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène ; 16 gr d'oxygène et 2 gr 016 d'hydrogène, se combinant pour donner 18 gr 016 d'eau liquide, dégagent 69.000 cal/gr. Ces 69.000 cal/gr correspondent à $4.185 \times 10^4 \times 69.000$ ergs, soit environ 288×10^{10} ergs ; et 288×10^{10} ergs entraînent d'après la formule (2) une variation de masse de $\frac{288 \times 10^{10}}{9 \times 10^{20}}$ gr, c'est-à-dire 3,2 millièmes de mgr.

Une variation de poids aussi faible ne peut être décelée avec la balance la plus sensible.

Les variations de l'énergie atomique sont beaucoup plus grandes. Comme nous le verrons bientôt, les variations de masse qu'elles déterminent vérifient la loi d'Einstein. Cette loi peut être aujourd'hui considérée comme une loi expérimentale ;

elle s'applique à toutes les formes d'énergie. Quand un corps reçoit de l'énergie sous une forme quelconque, sa masse augmente ; quand il en perd, sa masse diminue. « Le soleil, par exemple, perd continuellement de la masse transportée par la lumière qui le fuit (1). »

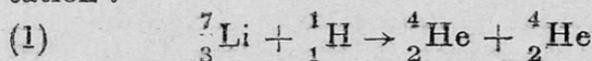
La masse et l'énergie pouvant se transformer réciproquement l'une en l'autre, le principe de la conservation de l'énergie et la loi de la conservation de la masse cessent d'être séparément exacts. Mais d'après la loi d'Einstein, le taux de la transformation est fixe : une masse d'un gramme se transforme toujours en $8,986 \times 10^{20}$ ergs, de telle sorte que ce nombre d'ergs représente la valeur d'un gramme mesurée en unités d'énergie ; inversement

un erg se transforme toujours en $\frac{1}{8,986 \times 10^{20}}$ gr
 ou $\frac{1,1128}{10^{21}}$ gr, ce qui est la valeur d'un erg en unités

de masse. Dès lors, dans un système isolé, la somme de la masse et de l'énergie (mesurée soit en unités d'énergie, soit en unités de masse) reste constante ; il n'y a plus deux quantités invariables, mais une seule, la somme de la masse et de l'énergie.

La matière est une forme prodigieusement condensée de l'énergie. A une masse d'un gramme correspondent 2.498×10^4 kWh ou 2.147×10^{10} cal/gr, soit la quantité de chaleur dégagée par la combustion de 2.750 t de charbon pur.

Bilans énergétiques des réactions nucléaires. — Considérons par exemple l'équation de transmutation :



(1) PERRIN, *L'énergie*.

Comme dans toute réaction de transmutation, la somme des nombres de masse écrits à gauche et en haut du symbole, dans le premier membre, est égale à la somme des nombres correspondants dans le deuxième membre. Mais remplaçons les nombres de masse par les masses isotopiques, c'est-à-dire les masses exactes des atomes ; dans l'échelle physique, la masse exacte de ${}^7_3\text{Li}$ est 7,0181 ; celle de ${}^1_1\text{H}$ est de 1,0081 ; celle de ${}^4_2\text{H}$ est de 4,0039 ; la somme des masses des atomes du premier membre est de 8,0262 ; celle des atomes du deuxième membre est de 8,0078 ; la différence est égale à 0,0184. Si on considère des atomes-gramme, la perte de masse dans la réaction nucléaire (1) est de 0 gr 0184 ; si on considère des atomes réels, elle est de $\frac{0 \text{ gr } 0184}{6,02 \times 10^{23}}$, ou 0,0184 u. m. a. Qu'est devenue la masse disparue ? Elle s'est transformée en énergie. D'après la relation d'Einstein :

$$(2) \quad \Delta m \text{ gr} = \frac{\Delta U \text{ ergs}}{8,986 \times 10^{20}} \quad (\text{page } 77)$$

on calcule aisément que la quantité d'énergie libérée par la transmutation d'un atome de ${}^7_3\text{Li}$ est de $2,74 \times 10^{-5}$ ergs environ, soit 17 MeV. La quantité d'énergie libérée par la transmutation d'un atome-gramme, c'est-à-dire de 7 gr 0181, de ${}^7_3\text{Li}$ est de $1,65 \times 10^{19}$ ergs, soit 168×10^9 kgm ou encore 394×10^6 cal/kg.

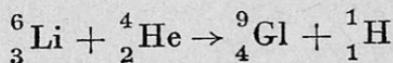
La formation d'une molécule-gramme d'eau liquide, c'est-à-dire de 18 gr 016 d'eau liquide à partir de 16 gr d'oxygène et 2 gr 016 d'hydrogène, dégage 69 cal/kg : c'est une quantité de chaleur

environ six millions de fois plus petite que celle qui correspond à la transmutation de 7 gr 0181 de ${}^7_3\text{Li}$. On voit combien le domaine de la chimie ordinaire et celui de la chimie nucléaire sont éloignés l'un de l'autre.

Nous avons déduit la quantité d'énergie libérée dans la réaction nucléaire (1) de la perte de la masse. On peut aussi la déterminer en mesurant l'énergie cinétique des deux particules α émises et retranchant de cette énergie l'énergie cinétique du proton de bombardement, qui est d'ailleurs presque négligeable. On trouve encore de cette façon environ 17 MeV, pour l'énergie libérée par la transmutation d'un atome ${}^7_3\text{Li}$.

D'une manière générale, on peut établir le bilan énergétique d'une réaction nucléaire soit en mesurant la variation de masse, soit en mesurant la variation d'énergie. Les deux méthodes conduisent à des résultats concordants, ce qui est une preuve expérimentale de l'exactitude de l'équation d'Einstein.

De même que les réactions chimiques sont les unes exothermiques, les autres endothermiques, les réactions nucléaires peuvent libérer ou absorber de l'énergie. Citons, comme exemple de réaction nucléaire endoergétique, la réaction :



qui absorbe 2 MeV.

« Packing effect ». — La masse d'un atome est toujours inférieure à la somme des masses de ses constituants : protons, neutrons et négatons. Cette perte de masse est, dit Aston, due au « packing effect ». Elle résulte de la libération d'énergie qui

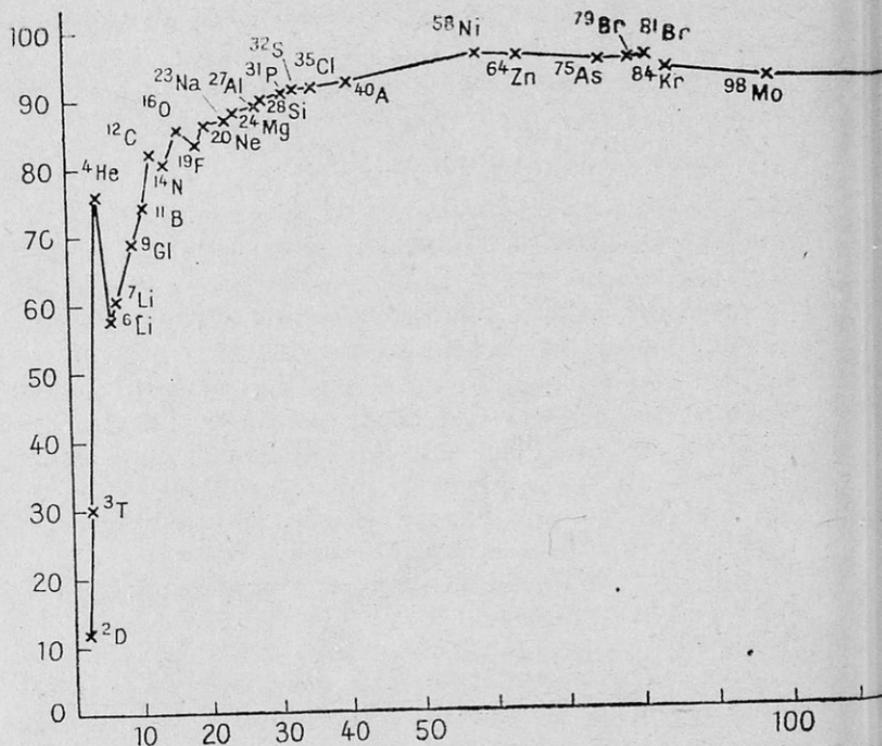
accompagne la formation du noyau. Si on la divise par le nombre $Z + N$ des protons et des neutrons, le quotient peut être considéré comme la perte de masse moyenne provenant d'un nucléon.

Considérons par exemple l'atome ${}_{35}^{79}\text{Br}$; il contient 35 protons, 35 négatons et 44 neutrons. Dans l'échelle physique la somme de la masse d'un proton et d'un négaton est 1,0081 u. m. a., la masse des 35 protons et des 35 négatons est $1,0081 \times 35 = 35,2835$ u. m. a. ; la masse des 44 neutrons est $1,009 \times 44 = 44,396$ u. m. a. ; de telle sorte que la somme des masses des constituants de l'atome est 79,6795 u. m. a. La masse réelle de l'atome étant 78,929 u. m. a., la perte de masse est 0,7505 u. m. a. La perte de masse par proton ou neutron est $\frac{0,7505}{79} = 0,0095$ u. m. a. (ce qui correspond à 8,8 MeV).

La courbe de la figure 21 a été tracée en prenant pour abscisse le nombre de masse, c'est-à-dire le nombre total des protons et des neutrons et pour ordonnée la perte de masse par nucléon.

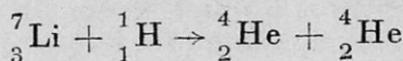
Après une rapide ascension, la courbe passe par un maximum qui correspond à peu près au nickel ; elle présente ensuite un long palier et elle décroît pour les atomes les plus lourds. L'atome ${}_{2}^{4}\text{He}$ occupe une pointe très marquée ; quelques autres atomes dont le nombre de masse est multiple de 4 : ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{8}^{16}\text{O}$ se trouvent sur des pointes beaucoup moins accusées.

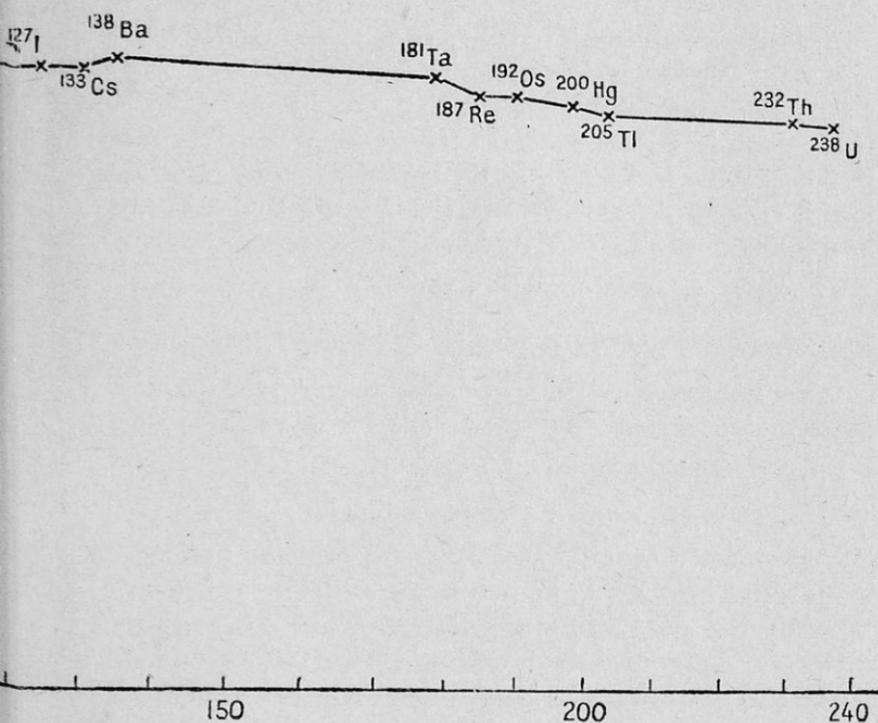
Pour les atomes qui se trouvent sur le long palier et la partie terminale descendante, le dégagement d'énergie qui correspond à la fixation d'un nucléon



est de 9 à 8 MeV (depuis 8,9 MeV pour $^{58}_{28}\text{Ni}$ jusqu'à 7,7 MeV pour $^{238}_{92}\text{U}$).

La formation des éléments de nombre atomique moyen à partir des éléments légers est très exoergétique puisque l'énergie de liaison d'un nucléon est sensiblement plus petite dans un élément léger que dans un élément moyen. Parmi les réactions nucléaires les plus exoergétiques se trouve la réaction :





en raison de la grande énergie de formation des noyaux ${}^4_2\text{He}$. La courbe montre que la décomposition des atomes les plus lourds en atomes moyens est également exoergétique. On est ainsi conduit à chercher à libérer l'énergie nucléaire soit par la formation des atomes moyens à partir des atomes légers, soit par la décomposition des atomes les plus lourds en atomes moyens.

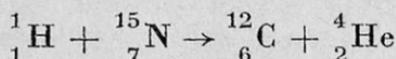
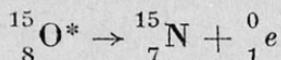
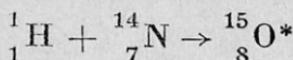
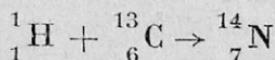
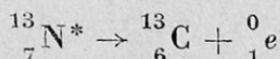
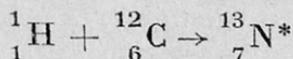
Nous avons vu que la lithosphère est formée en très grande partie d'atomes légers : leur transmutation en atomes de masse moyenne produirait un

énorme dégagement d'énergie. Notre planète est constituée d'éléments que l'on peut considérer comme formant un ensemble instable, et il n'est pas déraisonnable de craindre qu'un jour des expériences imprudentes la transforment en un immense brasier. Pour le moment, cependant, nous sommes loin d'être en mesure de réaliser les conditions dans lesquelles se produirait cette conflagration générale.

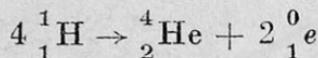
Les atomes moyens, depuis $^{20}_{10}\text{Ne}$ (dont la masse isotopique est 19,9986) jusqu'à $^{192}_{76}\text{Os}$ (191,98) ont des masses isotopiques un peu plus petites que leurs nombres de masse. Au contraire les atomes légers jusqu'à $^{19}_9\text{F}$ (19,0049) et les atomes lourds à partir de $^{193}_{77}\text{Ir}$ (193,041) ont des masses isotopiques un peu plus grandes que leurs nombres de masse. Pour les atomes légers et les atomes lourds, la perte de masse ne compense pas entièrement l'excès sur un nombre entier de la somme des masses des constituants ($1,0081 Z + 1,009 N$), tandis que pour les atomes moyens la perte de masse est supérieure à cet excès.

Origine de l'énergie solaire. Cycle de Bethe. — L'examen de la faune et de la flore de l'ère primaire montre que la température à la surface de la terre n'a pas varié depuis des centaines de millions d'années. Il doit en être de même du rayonnement solaire. Comment le soleil peut-il alimenter cette dépense d'énergie ? Les réactions chimiques seraient tout à fait insuffisantes ; si le soleil était formé de charbon et d'oxygène, leur combinaison n'aurait pu entretenir son rayonnement que pendant quelques milliers d'années. On a invoqué la contraction, sous l'influence de la force de gravitation, de la masse gazeuse incandescente qui forme l'astre : le calcul montre que l'énergie ainsi libérée ne serait pas en-

core assez grande. Il semble bien que l'énergie rayonnée par le soleil et les étoiles, a sa source dans des réactions nucléaires. Au centre du soleil, la température atteint 20 millions de degrés environ. Les protons ont déjà à des températures bien moins élevées une énergie cinétique suffisante pour produire des réactions nucléaires. Après une étude approfondie de la quantité d'énergie rayonnée par le soleil, de la température de l'astre et de sa composition, Bethe est arrivé à la conclusion que les réactions nucléaires qui se produisent actuellement dans le soleil forment le cycle suivant :



Les termes intermédiaires ayant disparu, le résultat global des six réactions du cycle est représenté par



L'atome primitif ${}^{12}_6\text{C}$ se trouve à nouveau formé, prêt à servir de point de départ à une nouvelle série de réactions.

Ce cycle de réactions peut entretenir l'énergie rayonnée par le soleil pendant plusieurs dizaines de milliards d'années.

CHAPITRE IV

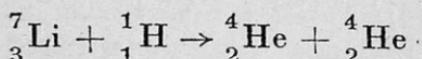
UTILISATION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE FISSION DE L'URANIUM BOMBE ATOMIQUE. PILE ATOMIQUE

Utilisation de l'énergie atomique. — Nous savons maintenant quelles prodigieuses quantités d'énergie se cachent à l'intérieur des atomes. C'est cette énergie que l'on appelle communément « énergie atomique ». Cependant comme elle se trouve dans les noyaux des atomes, on lui donne, dans le langage scientifique, le nom plus exact d'énergie nucléaire. Peut-on l'utiliser ?

La désintégration des substances radioactives naturelles met en jeu d'énormes quantités d'énergie. Nous avons vu (p. 20) que la désintégration de 1 gr de radium libère une quantité d'énergie qui est plus de trois cent mille fois celle qui provient de la combustion de 1 gr de charbon. Mais au bout de mille cinq cent quatre-vingt-dix ans, il n'y a que la moitié du gramme de radium qui s'est désintégrée. La production horaire d'énergie de 1 gr de radium est très faible et on sait que le prix de 1 gr de radium se chiffre par millions de francs. L'uranium, le thorium peuvent être obtenus en quantités beaucoup plus considérables que le radium ; mais comme leur période est très longue, leur débit d'énergie, même sous des poids considérables, reste très petit. C'est ainsi que la quantité d'énergie libérée par 100 kg d'uranium en un jour est inférieure à celle qui est

nécessaire pour élever de 1° la température de 1 l d'eau. Quant aux substances radioactives qui ont une très courte période, on ne peut les obtenir qu'en quantité infime.

Certaines réactions nucléaires dégagent aussi de très grandes quantités d'énergie. Dans la réaction :



la transmutation de 1 atome-gramme de lithium libère 168×10^9 kgm (p. 79), c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour élever 168.000 t à une hauteur de 1 km. Malheureusement, il faut des dizaines de milliers de protons pour atteindre un noyau de lithium, de telle sorte que l'énergie dépensée pour lancer les protons est supérieure à l'énergie produite par la réaction.

Aussi, l'astronome anglais Eddington pouvait-il dire en 1934 : « L'énergie atomique... est cadennassée d'une manière si inflexible que, pour tout le bien qu'elle peut nous procurer, elle pourrait tout aussi bien se trouver dans l'étoile la plus lointaine, à moins que nous ne sachions trouver la clef du cadenas. » C'est la désintégration de l'uranium sous l'influence des neutrons qui a donné cette clef.

Fission de l'uranium, du thorium et du protactinium. Réaction en chaîne. — Nous avons vu (p. 67) que le plus souvent, le noyau qui a capté une particule : proton, deuton, hélion ou neutron, laisse échapper une autre particule, comme une chaudière, dans laquelle la pression est trop grande, laisse fuser par la soupape un jet de vapeur. Tout autre est la décomposition, sous l'influence des neutrons, des trois derniers éléments de la classification périodique. Le noyau de chacun d'eux, après qu'un neutron s'y est introduit, est devenu si instable qu'il

éclate en donnant deux noyaux moyens, dont les masses sont à peu près entre elles dans le rapport de 3 à 2. Cette désintégration d'un genre spécial a reçu le nom de fission ou bipartition.

Elle est très exoergétique, comme on peut le prévoir d'après ce que nous avons vu sur le packing effect (p. 83), l'énergie de liaison d'un nucléon étant plus faible dans le noyau lourd qui subit la

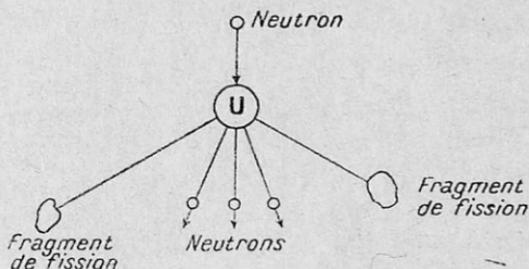


Fig. 22

fission que dans les noyaux moyens qui en résultent. La fission d'un noyau d'uranium libère sensiblement 200 MeV.

Le point capital est que, comme l'ont montré dès le début de l'année 1939, le P^r Joliot et ses collaborateurs Halban et Kowarski, la fission d'un atome d'uranium sous l'influence d'un neutron met en liberté plusieurs neutrons. Ceux-ci peuvent déterminer la fission de plusieurs noyaux d'uranium, dont chacun libère à son tour plusieurs neutrons. Il se produit ce que les chimistes appellent une réaction en chaîne. Quelques neutrons suffisent pour amorcer la réaction. Une fois amorcée, la réaction se propage d'elle-même, comme la combustion se propage dans une masse de poudre dont on enflamme une parcelle. La possibilité d'utiliser l'énergie nucléaire apparaît.

Produits de la fission de l'uranium. — En 1934, le physicien italien Fermi, ayant bombardé l'uranium par des neutrons, crut que le résultat de ce bombardement était la production d'éléments transuraniens. Ses expériences furent reprises par un grand nombre de physiciens éminents, parmi lesquels il faut citer en France Mme Irène Curie, le Pr Joliot, le Pr Thibaud. Il fut finalement établi que, s'il se produit en effet dans certaines conditions des éléments transuraniens, la réaction est en général beaucoup plus complexe. Comme il a été dit ci-dessus, le noyau d'uranium peut sous l'influence des neutrons se rompre en deux noyaux moyens. Nous avons vu (p. 73) que le rapport du nombre de neutrons au nombre de protons contenus dans un noyau croît avec le nombre atomique ; il est sensiblement plus élevé dans les noyaux des divers isotopes de l'uranium que dans ceux des atomes stables de nombre atomique moyen. Les deux noyaux, résultant de la rupture d'un noyau d'uranium, contiennent par suite une proportion excessive de neutrons ; ils se désintègrent et chacun d'eux donne naissance à une série de radioéléments, qui se termine par un élément stable. Les neutrons en excès disparaissent soit par simple rejet en dehors du noyau, ce qui produit l'émission de neutrons, soit par des désintégrations de type β , qui transforment les neutrons en protons.

Le noyau d'uranium peut se rompre en krypton et baryum, ou en xénon et strontium, ou en brome et lanthane, ou en zirconium et tellure, ou en rubidium et césium, etc. Comme chacun des noyaux qui résultent d'un des modes de rupture donne naissance à une série de radioéléments, les produits formés sont très nombreux.

A la fin de l'année 1946, de jeunes savants, tra-

vaillant au laboratoire du P^r Joliot, ont trouvé grâce à la technique des émulsions photographiques spéciales (p. 29) qu'un noyau d'uranium sur trois cents environ se rompt en trois fragments : ce n'est plus la bipartition, c'est la tripartition de l'uranium. Il se produit même quelquefois une explosion du noyau d'uranium en quatre morceaux.

La fission de l'uranium est presque instantanée : la durée de vie du noyau $^{239}_{92}\text{U}$, résultant de l'absorption d'un neutron par $^{238}_{92}\text{U}$, est inférieure à 5×10^{-13} s. Mais des neutrons peuvent être émis pendant plus d'une minute après la fission ; ces neutrons sont appelés neutrons différés ou neutrons retardés.

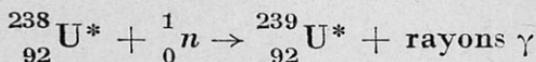
170 MeV sont libérés par la fission et 30 MeV par les désintégrations qui la suivent, soit en tout 200 MeV.

D'autre part, nous avons vu (p. 24) que l'uranium se désintègre spontanément en uranium X_1 et en hélium : il est le premier terme de la série d'éléments radioactifs à laquelle appartient le radium. Un autre mode de désintégration spontanée de l'uranium a été trouvée en 1940 ; l'uranium peut subir la fission, en émettant des neutrons, sans être soumis à aucun bombardement. La période de ce second mode de radioactivité est de 3 millions de milliards d'années ; la proportion des atomes qui le subissent est environ six cent mille fois plus petite que celle des atomes qui se désintègrent en UX_1 et en hélium.

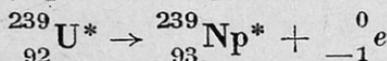
Influence de la vitesse des neutrons sur la fission des isotopes de l'uranium. — Pour embrasser le problème de la fission de l'uranium dans toute sa complexité, il faut encore observer que l'uranium naturel est un mélange de 3 isotopes : $^{238}_{92}\text{U}$ qui

forme 99,3 % de la masse totale, ${}^{235}_{92}\text{U}$ qui en forme 0,7 % et ${}^{234}_{92}\text{U}$ qui, ne se trouvant qu'à la très faible proportion de 0,006 %, peut être négligé.

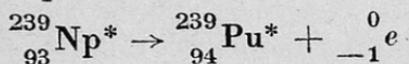
L'action des neutrons sur ${}^{238}_{92}\text{U}$ et ${}^{235}_{92}\text{U}$ varie suivant leur vitesse. Les 2 isotopes ${}^{238}_{92}\text{U}$ et ${}^{235}_{92}\text{U}$ subissent la fission sous l'influence des neutrons rapides dont l'énergie cinétique dépasse 1 MeV. Mais seul l'isotope ${}^{235}_{92}\text{U}$ subit la fission sous l'influence des neutrons lents : les neutrons thermiques, dont l'énergie est une fraction d'électron-volt, produisent la fission de ${}^{235}_{92}\text{U}$ avec une grande efficacité. Entre 10 et 100 électron-volts, l'isotope ${}^{238}_{92}\text{U}$ présente plusieurs bandes de résonance ; il capte fortement les neutrons qui ont un des niveaux d'énergie correspondants, en donnant ${}^{239}_{92}\text{U}^*$:



Le noyau formé ${}^{239}_{92}\text{U}^*$ est radioactif avec émission de négatons ; sa période est de vingt-trois minutes ; il donne par désintégration l'élément transuranien ${}^{239}_{93}\text{Np}^*$ (p. 68) qui a été appelé neptunium :



Le neptunium est également radioactif avec émission de négatons ; sa période est 2,3 jours. Il se transforme en plutonium :



Le plutonium est radioactif, mais sa période est très longue ; elle est de vingt-quatre mille ans. Il

peut subir la fission sous l'influence des neutrons rapides ou des neutrons lents ; ses réactions sous l'influence des neutrons sont semblables à celles de ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Éléments constitutifs de la bombe atomique. — L'utilisation de l'énergie nucléaire de l'uranium peut avoir deux buts différents : 1° La production d'un explosif d'une puissance prodigieuse, employé pour la fabrication des bombes atomiques ; 2° L'obtention d'une énergie industrielle contrôlable, servant aux industries du temps de paix.

Étudions d'abord le premier problème : la réalisation de la bombe atomique. Pour ce but, la fission de l'uranium par les neutrons lents ne saurait convenir. En effet, pour que la bombe ait une grande puissance, il faut qu'une partie importante des noyaux d'uranium ait subi la fission avant que l'explosion se produise. La propagation de la fission par neutrons thermiques durerait plusieurs millièmes de seconde ; ce temps serait beaucoup trop long ; la bombe éclaterait prématurément sous l'influence de la fission d'un petit nombre de noyaux ; sa puissance serait relativement faible.

D'autre part, on ne peut employer l'uranium naturel, parce que dans l'uranium naturel l'établissement d'une réaction en chaîne ne se produit pas. L'isotope ${}_{92}^{238}\text{U}$ ralentit les neutrons rapides par « diffusion inélastique » : son noyau peut capturer un neutron rapide et le relâcher avec une énergie cinétique plus faible ; une fois ralentis, les neutrons ne produisent plus la fission de ${}_{92}^{238}\text{U}$, et, lorsque leur énergie cinétique s'est affaiblie jusqu'à devenir une des énergies de résonance entre 10 et 100 électronvolts, ils sont captés par ${}_{92}^{238}\text{U}$ avec formation finale de plutonium.

La bombe atomique est chargée avec ${}_{92}^{235}\text{U}$, séparé de l'isotope ${}_{92}^{238}\text{U}$ beaucoup plus abondant dans l'uranium naturel, ou avec ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, produit de transmutation. Nous allons voir comment ont été réalisées en Amérique à l'échelle industrielle : 1° La séparation de l'isotope ${}_{92}^{235}\text{U}$; 2° La préparation du plutonium ${}_{94}^{239}\text{Pu}$.

Organisation des recherches. — La plupart des résultats, qui viennent d'être exposés, étaient déjà connus avant le commencement de la guerre. Une étude complète des travaux publiés sur la fission nucléaire parut dans le numéro de janvier 1940 de *Review of Modern Physics*, sous la signature du Pr Louis A. Turner de l'Université de Princeton (New-Jersey, U. S. A.). On s'était déjà rendu compte à cette époque que la fission de l'uranium pouvait permettre l'utilisation de l'énergie nucléaire et qu'elle présentait au point de vue militaire une importance considérable. Les savants français avaient eu une grande part dans ces découvertes. Leurs travaux continuèrent jusqu'à la défaite ; des brevets relatifs à la construction de machines à uranium furent pris par le Centre National de la Recherche scientifique. Après les désastres de nos armées, Halban et Kowarski, collaborateurs du Pr Joliot, passèrent en Angleterre avec tous les documents du laboratoire de chimie nucléaire. Par la suite les savants français Pierre Auger, Guéron, Goldschmidt les rejoignirent au Canada.

Des recherches étaient activement poursuivies dans les Universités anglaises, notamment dans celles d'Oxford, Cambridge, Londres, Liverpool, Birmingham. En septembre 1941, fut constitué en Angleterre un Comité qui, pour ne pas attirer l'at-

tention, prit le nom de Directoire des Tubes-Alliages. Des contrats furent passés entre le gouvernement anglais et les Universités. A la fin de 1941, une mission américaine fut envoyée en Grande-Bretagne et au début de 1942 une mission anglaise fut envoyée aux Etats-Unis. Vers la fin de 1942, il devint évident que les conditions de travail étaient meilleures en Amérique, loin des bombes ennemies. Un grand centre d'études fut créé à Montréal. En 1943, la plupart des chercheurs du Directoire des Tubes-Alliages se joignirent aux savants des Etats-Unis.

Dès l'automne 1939, le président Roosevelt créa aux Etats-Unis le « Comité consultatif de l'Uranium », qui devint ensuite la Section de l'Uranium du « National Defense Research Committee ». Des contrats furent conclus avec diverses Universités. La « National Academy of Sciences » créa au printemps de 1941 un Comité d'études, présidé par le Pr Compton, pour estimer l'importance des dépenses à prévoir et des résultats à espérer. A la suite des rapports de ce Comité, le gouvernement des Etats-Unis décida en novembre 1941 d'étendre le programme des recherches ; leur direction fut transférée à l' « Office of scientific Research and Development » (O. S. R. D.).

En janvier 1942, Compton concentra les travaux dont il avait la charge à l'Université de Chicago ; le groupe de l'Université Columbia, sous la direction de Fermi, et le groupe de Princeton se transportèrent aussi à Chicago au printemps de 1942. Ainsi fut créé à l'Université de Chicago un grand laboratoire de physique nucléaire, auquel on donna le nom de « Laboratoire métallurgique » pour que son véritable objet restât secret. Le laboratoire d'Argonne fut construit aux environs de Chicago au début de 1943.

Au milieu de l'année 1942, les réalisations industrielles étant en vue, une section fut créée dans le corps des Ingénieurs militaires, sous le nom de « Manhattan District » pour la mise en route de la production. Elle eut à sa tête, à partir du mois de septembre 1942, le brigadier général L. R. Groves.

Vers la fin de 1942, l'armée acquit pour l'établissement des usines un territoire de 200 km² à Oak Ridge, au voisinage de Clinton, dans la vallée du Tennessee. Le domaine de Clinton étant insuffisant, l'armée acheta au commencement de 1943, dans l'Etat de Washington, près de la rivière Columbia, des terrains d'une contenance d'un millier de km², comprenant les deux villages de Hanford et de Richland.

Pour l'étude de la bombe atomique elle-même, dont le secret devait être gardé avec un soin particulier, le général Groves décida de créer un laboratoire dans une région presque désertique : l'emplacement choisi fut celui de Los Alamos dans le Nouveau Mexique. Le Pr Oppenheimer prit la direction de ce laboratoire en 1943.

Comme on sait, beaucoup de dispositions relatives à la bombe atomique n'ont pas été divulguées. Cependant des renseignements étendus ont été donnés notamment dans la déclaration faite par le Directeur des Tubes-Alliages et surtout dans le rapport officiel américain, publié par le Pr Smyth, avec l'assentiment du major général Groves et intitulé « L'Energie atomique pour des fins militaires » (1).

Purification de l'uranium. — Nous avons vu (p. 66) que certains corps comme le bore, même à doses très faibles, absorbent les neutrons ; il était

(1) Ces documents ont été traduits en français par Maurice-E. NAHMIAS.

nécessaire de les éliminer d'une façon pratiquement complète. La première opération devait donc être de préparer des composés d'uranium très purs.

Jusque-là, les minerais d'uranium étaient surtout exploités pour l'extraction du radium ; les résidus de la préparation du radium ne trouvaient que des emplois insuffisants (verre d'urane, glaçure de la porcelaine, photographie, aciers spéciaux, catalyseurs). En 1941, le produit commercial était un oxyde noir d'uranium contenant de 2 à 5 % d'impuretés. Appliquant une méthode donnée en 1842 par Péligot, on se débarrassa des impuretés en dissolvant le nitrate d'uranyle dans l'éther. Le procédé qui permit d'obtenir l'uranium métallique très pur est resté secret.

Séparation de $^{235}_{92}\text{U}$ par la méthode de la diffusion gazeuse. — Nous avons vu (p. 49) les différents moyens qui peuvent être employés pour la séparation des isotopes en quantité pondérable. On adopta finalement la diffusion gazeuse et la séparation électro-magnétique.

Pour appliquer la diffusion gazeuse, on s'est adressé d'abord à l'hexafluorure d'uranium UF_6 qui a une tension de vapeur d'une atmosphère à la température de 56° . Ce composé a l'avantage que, le fluor étant formé d'une seule espèce d'atomes, la séparation ne s'opère que sur les isotopes de l'uranium ; mais il présente l'inconvénient d'être solide sous la pression atmosphérique à la température ordinaire. Le rapport Smyth dit seulement : « Il était donc intéressant d'étudier sans retard d'autres composés gazeux de l'uranium. »

Les difficultés étaient énormes. On sait (p. 49) que les diverses molécules passent à travers une cloison percée de très petits orifices avec des vi-

tesses inversement proportionnelles aux racines carrées de leurs poids. Le rapport des vitesses de passage de $F^6 \text{}_{92}^{235}\text{U}$ et de $F^6 \text{}_{92}^{238}\text{U}$ est $\sqrt{\frac{352}{349}} = 1,0043$.

L'enrichissement à chaque traversée est, on le voit, extrêmement faible. L'usine fut construite à Clinton. Les gaz traversaient des milliers d'étages successifs de parois poreuses, appelées, dans le rapport Smyth, barrières. La surface totale des barrières était de plusieurs hectares. Le diamètre de chacun des milliards de petits trous des barrières devait être inférieur au cent millième de millimètre ; ils ne devaient ni s'agrandir par la corrosion ni se boucher par les poussières ; enfin les barrières devaient résister à une différence de pression d'une atmosphère, car, au début de la diffusion, la pression était d'un côté d'environ une atmosphère et de l'autre presque nulle. On arrêtait la diffusion à travers une barrière lorsque la moitié à peu près du gaz l'avait traversée ; la partie non diffusée retournait à l'étage inférieur, tandis que la partie diffusée était comprimée et envoyée à l'étage supérieur. Des milliers de pompes furent nécessaires. Les pompes et les canalisations devaient être d'autant plus étanches que les composés de l'uranium sont des poisons violents.

On peut juger des efforts et de l'habileté technique qui furent nécessaires pour arriver à un résultat satisfaisant.

Séparation de $\text{}_{92}^{235}\text{U}$ par la méthode électromagnétique. Calutron. — Le spectographe de masse permet d'obtenir du premier coup une excellente séparation des isotopes. Malheureusement les quantités d'isotopes séparées par cette méthode étaient extrêmement faibles, de l'ordre du millionième de gramme par jour. Le P^r Lawrence réalisa un appareil d'effi-

cacité beaucoup plus grande auquel il donna le nom de *calutron* (de California University Cyclotron). Le principe du calutron est le même que celui du spectographe de masse utilisé en 1918 par Dempster. Les molécules gazeuses sont transformées par un

Source d'ions

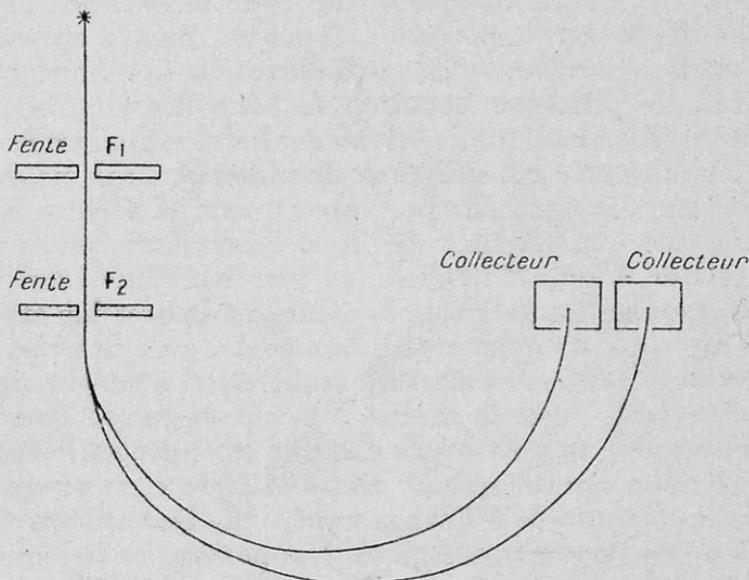


Fig. 23

arc électrique en ions ; ceux-ci traversent successivement la fente F_1 et la fente F_2 (fig. 23) de façon à former un étroit faisceau cylindrique ; entre ces deux fentes, ils sont accélérés par un champ électrique, qui leur fait subir à tous la même chute de potentiel V . Un ion, de charge e et de masse m , acquiert une énergie cinétique

$$(1) \quad eV = \frac{1}{2} mv^2$$

Les ions sont ensuite soumis à un champ magnétique d'intensité \mathcal{H} perpendiculaire à leur direction ; chacun d'eux décrit (p. 10) un arc de circonférence de rayon R tel que :

$$(2) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{v} \frac{e}{m} \mathcal{H}$$

De (1) et (2) on tire :

$$(3) \quad \frac{1}{R^2} = \frac{\mathcal{H}^2}{2V} \frac{e}{m}$$

d'où il résulte que les ions de l'isotope ${}_{92}^{235}\text{U}$, ayant une masse un peu plus faible que ceux de l'isotope ${}_{92}^{238}\text{U}$, décrivent un arc de circonférence de rayon un peu plus petit ; on recueille chaque espèce d'ion dans un collecteur approprié. Il faut d'une part avoir une source d'ions assez intense et d'autre part éviter que les deux faisceaux d'ions courbés en arcs de circonférences empiètent l'un sur l'autre. On augmente le rendement en opérant sur un mélange d'isotopes déjà enrichi en isotope léger par la diffusion gazeuse.

Les appareils furent construits à Clinton en 1943. Comme le cuivre manquait, le ministère des Finances prêta 14.000 t d'argent pour les bobinages des électroaimants.

Production du plutonium. Principe de la méthode.

— Nous avons vu (p. 91) que ${}_{92}^{238}\text{U}$ capte abondamment les neutrons qui ont une des énergies de résonance comprises entre 10 et 100 MeV, et qu'il se forme ainsi successivement ${}_{92}^{239}\text{U}$, ${}_{93}^{239}\text{Np}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. Mais comment avoir assez de neutrons pour obtenir des quantités importantes de ${}_{94}^{239}\text{Pu}$? Une idée géniale fut de partir de l'uranium naturel formé des iso-

topes ${}_{92}^{235}\text{U}$ et ${}_{92}^{238}\text{U}$ et de produire par la fission en chaîne de ${}_{92}^{235}\text{U}$ les neutrons qui doivent être captés par ${}_{92}^{238}\text{U}$. Le problème était d'abord de créer une réaction en chaîne dans l'uranium naturel.

Réaction en chaîne dans l'uranium naturel. Emploi d'un modérateur. Pile atomique. — Pour qu'une réaction en chaîne puisse s'établir, il faut que parmi les neutrons provenant de chaque fission, un au moins détermine une nouvelle fission ; nous avons vu (p. 92) qu'il n'en n'est pas ainsi dans l'uranium naturel ; pour obtenir dans l'uranium naturel une réaction en chaîne, il est nécessaire de diminuer la proportion des neutrons captés sans fission par ${}_{92}^{238}\text{U}$ et de favoriser au contraire la fission de ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Le Pr Joliot et ses collaborateurs à Paris, le Pr Fermi aux Etats-Unis, le Pr George Thomson à Londres ont montré que ce résultat peut être atteint en ajoutant à l'uranium naturel un corps contenant des atomes légers, auquel on donna le nom de modérateur. Ainsi que nous l'avons vu (p. 65) les neutrons rapides subissent contre les noyaux légers des atomes du modérateur des chocs élastiques qui ralentissent leurs vitesses et les transforment en neutrons thermiques particulièrement efficaces pour produire la fission de ${}_{92}^{235}\text{U}$. Mais il ne faut pas que l'uranium et le modérateur soient mélangés d'une manière homogène, car les énergies de résonance (entre 10 et 100 électron-volts) étant intermédiaires entre les énergies cinétiques des neutrons rapides et celles des neutrons thermiques, les neutrons passeraient par ces énergies de résonance alors qu'ils sont au voisinage de ${}_{92}^{238}\text{U}$ et ils seraient captés sans fission. Le modérateur et l'uranium sont en masses dis-

tinctes : l'uranium est distribué régulièrement à l'intérieur du modérateur. La plupart des neutrons passent par les énergies de résonance alors qu'ils se trouvent dans le modérateur. Dans ces conditions, la capture sans fission des neutrons par $^{238}_{92}\text{U}$ est assez diminuée et la fission de $^{235}_{92}\text{U}$ par les neutrons thermiques devient assez grande pour qu'une réaction en chaîne s'établisse. Le dispositif a reçu le nom de pile.

Destinées des neutrons provenant de la fission. Facteur de multiplication. — Appelons neutrons primaires les neutrons qui existent dans un système à un moment donné ; un certain nombre de ces neutrons provoqueront des fissions qui donneront naissance à de nouveaux neutrons ; désignons ceux-ci, qui ont remplacé les neutrons primaires, sous le nom de neutrons secondaires. On appelle facteur de multiplication, k , le rapport entre le nombre des neutrons secondaires et celui des neutrons primaires. Si par exemple 100 neutrons primaires sont remplacés par 105 neutrons secondaires, $k = 1,05$. Il est clair que k doit être supérieur ou au moins égal à 1 pour qu'une réaction en chaîne s'établisse.

La figure 24 représente schématiquement une réaction en chaîne dans le mélange d'uranium naturel et de modérateur qui forme la pile. Les neutrons provenant de la fission d'un noyau $^{235}_{92}\text{U}$ peuvent :

- 1° Etre captés avec fission par $^{235}_{92}\text{U}$: c'est la source principale des neutrons secondaires ;
- 2° Etre captés avec fission, lorsqu'ils sont encore rapides, par $^{238}_{92}\text{U}$;
- 3° Etre captés sans fission, avec production finale de plutonium, par $^{238}_{92}\text{U}$, quand ils ont une énergie

cinétique égale à une des énergies de résonance ;
 4° Être captés avec fission par le plutonium déjà

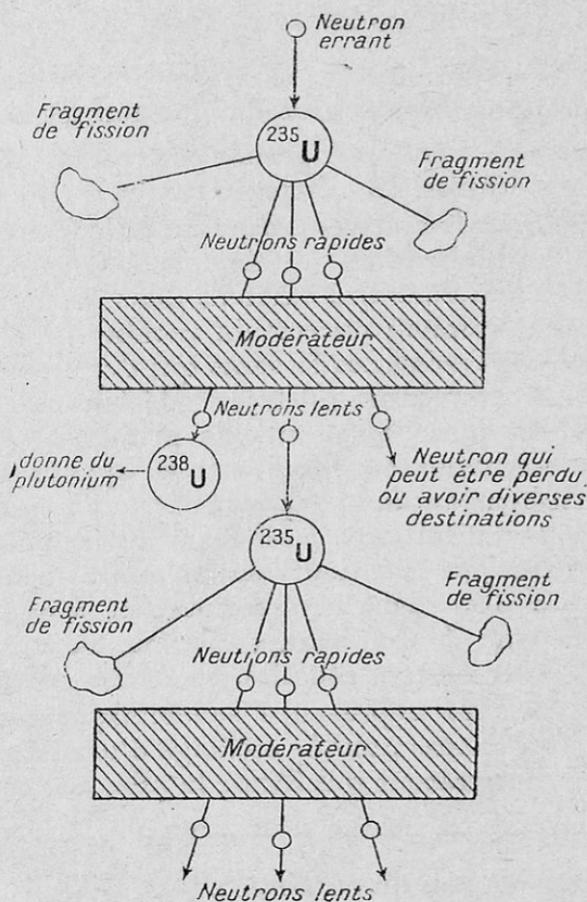


Fig. 24

formé qui a, à l'égard des neutrons, sensiblement les
 mêmes propriétés que $^{235}_{92}\text{U}$;

5° Être captés par les impuretés ;

6° Etre captés par les produits de fission ou de désintégration de l'uranium ;

7° Etre captés par le modérateur ;

8° S'échapper de la pile et se perdre au dehors.

Le modérateur diminue les neutrons du paragraphe 3° et augmente ceux du paragraphe 1° ; ainsi que nous l'avons vu déjà, on diminue ceux du paragraphe 5° par une purification extrêmement poussée de l'uranium.

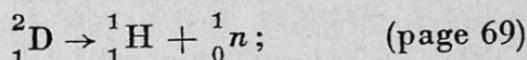
Choix du modérateur. — Le modérateur doit être formé par un élément de petit poids atomique (p. 65) ; il doit de plus n'absorber qu'une très petite proportion des neutrons. Cette dernière condition élimine le lithium, le bore et même l'hydrogène qui absorbe les neutrons en donnant du deutérium. L'hélium ne peut pas être utilisé, parce que, comme il ne forme pas de composé, il faudrait employer l'hélium lui-même à l'état gazeux, ce qui donnerait à la pile des dimensions trop considérables. Reste le deutérium, le glucinium et le carbone.

Les Français et les Anglais s'intéressèrent au deutérium sous forme d'eau lourde. En 1940, des officiers français se rendirent en Norvège en mission spéciale et, grâce à leur action intelligente et courageuse, rapportèrent en France 165 l d'eau lourde. Au moment de l'effondrement militaire, ce précieux stock fut confié par le Pr Joliot à Halban et Kowarski qui l'emportèrent en Angleterre.

Les Allemands ont aussi adopté le deutérium ; les usines de Norvège fabriquèrent pour eux de l'eau lourde et de la paraffine de deutérium. Le physicien allemand Heisenberg a révélé que dans l'hiver 1943-1944, une pile à l'eau lourde fut construite au laboratoire de Berlin-Dahlem.

L'eau lourde est très efficace pour ralentir les neutrons et elle les absorbe très peu ; de plus elle a

l'avantage de fournir des neutrons par décomposition du deutérium sous l'influence des rayons γ émis au cours de la fission de l'uranium et des désintégrations qui la suivent :



ces neutrons supplémentaires améliorent la balance production-absorption de neutrons. Les Américains construisirent et étudièrent une pile à eau lourde au laboratoire d'Argonne ; son fonctionnement fut très satisfaisant. Ils abandonnèrent cependant l'eau lourde comme modérateur en raison de la difficulté de produire de grandes quantités d'eau lourde.

Le glucinium se montre aussi un modérateur efficace ; comme le deutérium, il présente l'avantage d'émettre des neutrons sous l'influence des rayons γ (p. 70). Ce fut encore la difficulté de l'obtenir en grande quantité et à un très haut degré de pureté qui le fit abandonner.

Le modérateur finalement adopté fut le graphite. On produisait déjà aux Etats-Unis plusieurs centaines de tonnes de graphite par an ; le problème fut de l'amener à un état de pureté suffisant. La distance que doit parcourir dans le graphite un neutron rapide, pour être amené à l'état de neutron thermique, est d'environ 40 cm.

Dimensions critiques. — Pour obtenir l'établissement d'une réaction en chaîne, il fallait encore diminuer la proportion des neutrons qui s'échappent de la pile et se perdent au dehors (p. 103, 8^o). Il est clair que cette condition conduit à augmenter les dimensions de la pile : plus la pile est grosse, plus long est le chemin que doit parcourir un neutron avant d'en sortir et, par suite, plus il a de chance d'être capté.

Si on augmente les dimensions de la pile, sans

changer ni sa forme, ni sa composition, ni aucun de ses caractères, on atteint une dimension, appelée dimension critique, pour laquelle le facteur de multiplication k devient égal à l'unité. La réaction en chaîne s'établit lorsque la pile a la dimension critique.

Les dimensions critiques des piles à eau lourde sont plus petites que celles des piles à graphite : l'emploi de l'eau lourde améliore, en effet, comme nous venons de le voir, la balance production-absorption de neutrons ; d'autre part, l'eau lourde est un modérateur plus efficace que le graphite, de telle sorte qu'il suffit d'une épaisseur moindre d'eau lourde pour transformer les neutrons rapides en neutrons thermiques.

Lorsque la pile a la dimension critique, elle se met à fonctionner d'elle-même, sans qu'il soit besoin de déclancher la réaction par l'envoi de neutrons. Il y a toujours assez de neutrons errants, soit qu'ils proviennent de la désintégration spontanée de l'uranium (p. 90), soit qu'ils soient produits par l'action des rayons α de l'uranium sur les impuretés, soit qu'ils aient une origine cosmique.

Dispositions adoptées. — La première pile fonctionna au Laboratoire métallurgique de Chicago, au mois de décembre 1942 ; elle avait une puissance de 200 W et elle permit d'importantes recherches. En 1943, une pile fut construite à Clinton ; sa puissance, qui était au début de 500 kW, fut portée à 800, puis à 1.800 kW. Les grandes installations industrielles furent édifiées à Handford en 1944 ; elles comprirent trois piles placées à plusieurs kilomètres les unes des autres.

Dans la pile du Laboratoire de Chicago, l'uranium était réparti en lingots régulièrement espacés au sein de la masse de graphite. Cette disposition est la plus avantageuse au point de vue du facteur de

multiplication, mais elle ne permet pas d'enlever l'uranium sans démonter la pile : aussi fut-elle abandonnée. Le bloc de graphite fut percé à inter-

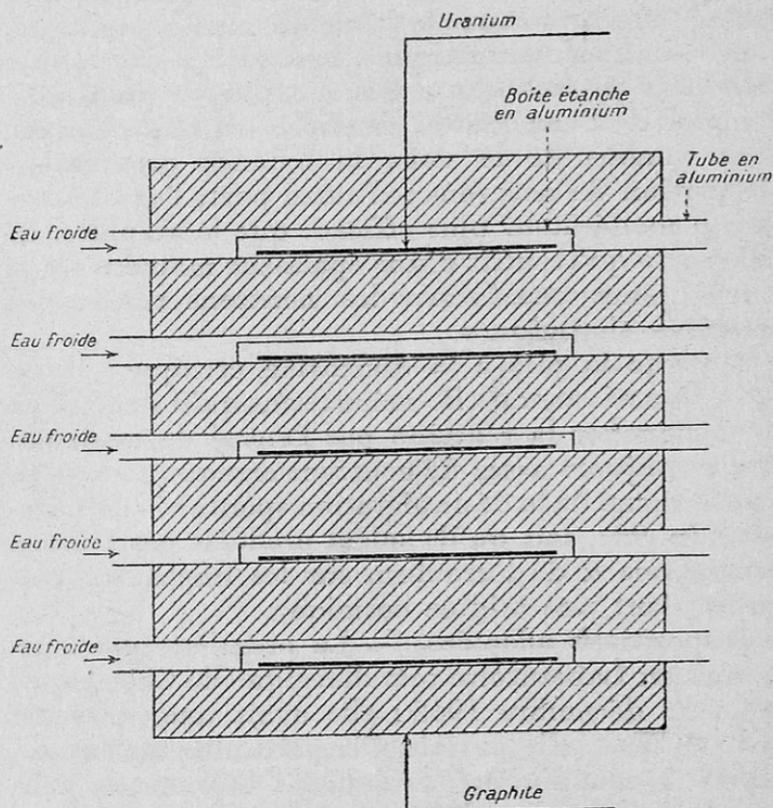


Fig. 25

valles réguliers de tunnels horizontaux (fig. 25) dans lesquels les tiges d'uranium étaient introduites : leur mise en place et leur enlèvement étaient très faciles.

L'énergie libérée par la pile élève sa température. Pour éviter une élévation de température excessive, il était nécessaire de refroidir la pile énergiquement.

Différents refroidisseurs furent étudiés. Ce fut l'eau qui fut finalement adoptée ; comme elle ne devait être en contact ni avec le graphite ni avec l'uranium, elle circulait dans des canalisations métalliques passant dans les tunnels du graphite ; le métal de ces canalisations ne devait pas absorber les neutrons : l'aluminium fut seul jugé convenable. Les tiges d'uranium étaient placées à l'intérieur des canalisations dans des boîtes étanches en aluminium. A Hanford, la quantité d'eau employée fut aussi considérable que celle qui est nécessaire pour l'alimentation d'une grande cité. L'eau de refroidissement, devenue radioactive, était envoyée dans des bassins où elle séjournait quelque temps avant d'être rejetée à la rivière.

Si, dans la pile, le facteur de multiplication doit être au moins égal à l'unité, il ne peut s'élever sensiblement au-dessus de cette valeur, car la réaction s'emballerait et deviendrait explosive. On parvient à la contrôler en plaçant dans un certain nombre de tunnels des substances absorbant fortement les neutrons : barres de cadmium ou d'acier au bore. Ces barres sont reliées à des appareils automatiques, qui les enfoncent plus profondément dans la pile quand le facteur k tend à s'accroître, ou, au contraire, les retirent partiellement s'il vient à diminuer. Les appareils automatiques ne peuvent être absolument sans inertie. Ils permettent cependant de contrôler la réaction, d'une part parce que le facteur de multiplication est maintenu très voisin de l'unité (dans la première pile il ne dépassait pas 1,0006) et d'autre part à cause de l'existence des neutrons retardés (p. 90) qui sont émis pendant plus d'une minute après la fission.

On réduit considérablement les dimensions critiques de la pile en l'entourant d'une couche de gra-

phite qui réfléchit vers son intérieur une forte proportion des neutrons.

Les corps provenant de la fission de l'uranium sont extrêmement radioactifs : un séjour d'une fraction de seconde dans le champ des radiations émises par la pile serait mortel. Aussi l'ensemble de la pile est entouré de murs très épais en ciment et en acier. La manipulation des tiges d'uranium et de tous les appareils auxiliaires se fait à l'aide d'appareils télécommandés. D'après le P^r Lawrence « les mécanismes de cette énorme masse sont ajustés avec la finesse de la montre la plus délicate et obéissent avec la sensibilité du plus beau Stradivarius ».

Extraction du plutonium. — A mesure que la pile fonctionne, la quantité de $^{235}_{92}\text{U}$ diminue, ce qui affaiblit le facteur de multiplication. Les noyaux radioactifs produits par la fission sont d'autre part très défavorables à ce facteur. Par contre, le plutonium formé subit la fission sous l'influence des neutrons thermiques, comme $^{235}_{92}\text{U}$. Pratiquement, on arrête le fonctionnement de la pile bien avant que tout l'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ ait disparu. Il s'agit de séparer le plutonium. Comme l'uranium et le plutonium sont des éléments distincts et non des isotopes, leurs propriétés chimiques sont différentes, et par suite leur séparation est moins pénible que celle des isotopes de l'uranium. Mais il faut isoler quelques grammes de plutonium à partir de kilogrammes d'uranium mêlé d'un grand nombre de produits de fission. Le rapport Smyth dit simplement qu'on fait passer les métaux en solution et qu'on opère une série de précipitations, de dissolutions, d'oxydations et de réductions. A la sortie de la pile, les barres de métal, intensément radioactives, sont transportées, mécaniquement.

ment et sous enveloppe arrêtant les radiations, aux ateliers de traitement ; ceux-ci comprennent une suite de compartiments à murs de ciment très épais et presque complètement enterrés.

Précautions sanitaires. — Des précautions minutieuses sont prises pour éviter que la santé des opérateurs soit altérée par les radiations. En arrivant le matin, chacun reçoit un électroscope de la grosseur d'un stylographe ; le soir, l'examen de l'électroscope permet de connaître le rayonnement auquel a été soumis celui qui l'a porté. Des instruments spéciaux mesurent la contamination des bureaux et des ateliers. Le personnel est assujéti à des prises de sang périodiques.

La bombe atomique. — Tandis que dans la pile le facteur de multiplication doit être très voisin de l'unité pour que la réaction puisse être contrôlée, il doit être très nettement supérieur à 1 dans la bombe. Ainsi qu'il a été expliqué p. 93, la bombe est chargée soit avec l'isotope $^{235}_{92}\text{U}$, soit avec le plutonium $^{239}_{94}\text{Pu}$. Il y a toujours assez de neutrons errants pour déclencher la réaction dès que les dimensions critiques sont atteintes : aussi ne peut-on conserver une bombe ayant les dimensions critiques. La masse de l'élément explosif est divisée en deux parties ; on produit la détonation en rassemblant brusquement ces deux parties. La méthode employée pour atteindre ce but paraît être de projeter l'une des parties contre l'autre, au moyen d'une charge d'explosif ordinaire, de façon à réaliser un contact parfait et soudain. La figure 26 fait comprendre le dispositif adopté ; c'est la représentation, évidemment très schématique, d'une bombe.

On réduit les dimensions critiques de la bombe en l'entourant d'une enveloppe qui réfléchit vers la

bombe les neutrons échappés à l'extérieur. Cette enveloppe joue dans la bombe un autre rôle ; elle retarde l'éclatement par son inertie ; elle augmente ainsi la proportion des noyaux qui subissent la fission et elle rend la bombe plus puissante.

Les dimensions de la bombe sont tenues secrètes. Cependant au moment de l'attaque de Hiroshima,

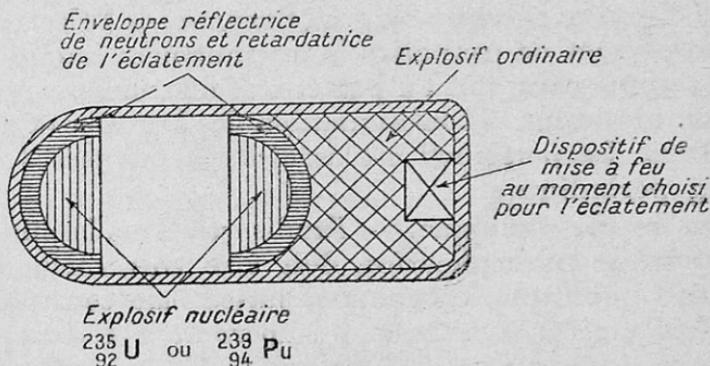


Fig. 26

le président Truman déclara que la puissance de la bombe était équivalente à celle de 20.000 t de trinitrotoluène. On pense d'autre part que le rayon critique ne dépasse pas une dizaine de centimètres. D'après cela, il est vraisemblable que la quantité d'uranium ou de plutonium contenue dans la bombe est de quelques dizaines de kilogrammes. Le poids total de la bombe est probablement de quelques centaines de kilogrammes.

Emploi industriel de l'énergie nucléaire. — Dans le proche avenir, l'application de l'énergie nucléaire aux industries pacifiques paraît devoir se faire au moyen de piles assez semblables à celle que nous avons décrite. Aussi bien, l'équipe française dirigée par le Pr Joliot a-t-elle trouvé le principe de la pile

en cherchant à réaliser non des bombes atomiques, mais des machines à uranium productrices d'énergie.

Pendant la guerre, il s'agissait pour les Américains de parvenir dans le plus court délai à la fabrication des bombes ; c'est pourquoi ils ne se sont pas souciés d'utiliser l'énergie libérée dans les piles ; l'eau de refroidissement était rejetée à la rivière. En réalité, la pile a un triple rôle. Elle fournit du plutonium, elle fabrique des produits de fission, elle libère de l'énergie.

Le plutonium, séparé de l'uranium et des produits de fission, sert à charger la bombe atomique. Dans les piles destinées à la production d'énergie industrielle, il a un rôle non moins important. Nous avons vu (p. 108), que, pour que le facteur de multiplication se maintienne égal à l'unité, on doit enlever les tiges d'uranium de la pile bien avant que tout l'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ ait disparu, alors qu'une petite partie seulement de $^{238}_{92}\text{U}$ est transformée en plutonium. Si l'uranium n'était pas employé à nouveau dans des piles, l'utilisation de son énergie de fission serait faible. Mais, après que les produits de fission, très défavorables au facteur de multiplication, ont été éliminés, il est possible de faire avec le plutonium obtenu et l'uranium régénéré des barres où $^{235}_{92}\text{U}$ est remplacé par du plutonium : ces barres jouent dans les piles le même rôle que les barres d'uranium naturel. L'idéal serait de refaire ainsi des barres d'uranium et de plutonium jusqu'à ce que tout l'uranium $^{238}_{92}\text{U}$ soit, par l'intermédiaire du plutonium, transformé en produits de fission. Le degré d'épuisement de l'énergie de fission de l'uranium naturel, qui peut être pratiquement obtenu dans la pile, a évidemment une importance primordiale

pour le prix de revient de l'énergie fournie par la pile.

Les produits de fission peuvent de même avoir soit des applications militaires, soit des applications pacifiques. Etant intensément radioactifs, ils constituent une arme infiniment plus dangereuse que les gaz de combat, car aucun masque n'est capable d'en préserver (1). Mais, d'autre part, ils sont pour la science et pour la médecine de précieux auxiliaires. Ils sont déjà fournis par les usines atomiques américaines à plus de 300 laboratoires et hôpitaux, non seulement aux Etats-Unis, mais dans le monde entier. C'est par kilogrammes qu'ils seront produits par les piles. Ils permettront d'importantes recherches en physique, en chimie, en biologie et ils constitueront un arsenal thérapeutique plus varié et plus abondant que le radium employé jusqu'ici.

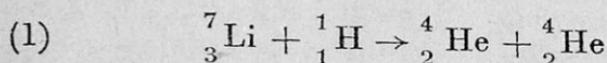
Pour l'emploi de la pile comme source d'énergie, on utilise dans une machine thermique la chaleur emportée par la substance refroidissante, liquide ou gazeuse, qui a parcouru les tunnels creusés dans le modérateur ; la principale difficulté paraît être de faire fonctionner la pile à haute température ; on sait en effet qu'une machine thermique n'a un bon rendement que si elle fonctionne à haute température.

Fission du thorium et du protactinium. — Le thorium et le protactinium subissent comme l'uranium la fission sous l'influence des neutrons. Etant comme l'uranium assez répandu, le thorium jouera probablement un rôle important dans l'utilisation de l'énergie nucléaire ; quant au protactinium, sa rareté lui enlève tout intérêt pratique.

Réactions nucléaires exoergétiques autres que les fissions. — Les fissions des derniers éléments de la

(1) Les Américains n'ont pas voulu s'en servir pendant la dernière guerre parce qu'ils peuvent être assimilés aux gaz de combat interdits par les conventions internationales.

classification périodique ne sont pas, nous le savons, les seules réactions nucléaires très exoergétiques. La réaction :



par exemple, libère (p. 79) 17 MeV par atome de lithium, soit $17 \times 6,02 \times 10^{23}$ MeV par atome-gramme. La fission de l'uranium libère $200 \times 6,02 \times 10^{23}$ MeV par atome-gramme d'uranium. L'énergie dégagée par gramme de lithium dans la réaction (1) est d'environ $2,4 \times 6,02 \times 10^{23}$ MeV, tandis que celle qui est dégagée par la fission d'un gramme d'uranium est inférieure à $1 \times 6,02 \times 10^{23}$ MeV. Par gramme de métal, la réaction (1) libère plus d'énergie que la fission de l'uranium. Malheureusement il faut lancer plusieurs dizaines de milliers de protons pour produire la transmutation d'un noyau de lithium. Mais, à une température suffisamment élevée, les protons et les noyaux de lithium doivent avoir une énergie cinétique telle que la réaction (1) résulte de leurs collisions. Le problème est de les porter à cette température ; peut-être est-il possible d'y parvenir en utilisant la fission de l'uranium ou du plutonium ; cette fission servirait à déclencher la réaction (1) en chauffant de l'hydrure de lithium.

La production d'hélium à partir de deutérium est encore plus exoergétique. D'après le journal anglais *Daily Express*, les bombes que l'armée et la marine américaines ont expérimentées au printemps de 1948, dans l'atoll d'Eniwetok, devaient leur puissance à cette réaction déclenchée par l'uranium ou le plutonium. Le composé du deutérium employé serait probablement l'eau lourde.

Remarquons d'autre part que d'après la loi d'Einstein (page 77) la transformation totale de la masse d'un atome d'uranium en énergie libérerait plus de

200.000 MeV c'est-à-dire plus de mille fois les 200 MeV qui sont dégagés par la fission de cet atome. Nous avons vu (p. 78) qu'une masse de 1 gr d'une substance quelconque correspond à 25 millions de kilowatts-heure. Mais la transformation totale, ou même avec un rendement de quelques centièmes, d'une masse de 1 gr en énergie n'est pas actuellement en vue.

A qui revient le mérite de l'utilisation de l'énergie atomique ? — L'utilisation de l'énergie atomique est l'aboutissement des progrès étonnants de la physique et de la chimie depuis un demi-siècle. Toutes les grandes nations ont contribué à ces progrès. Les savants français y ont pris une part éminente : rappelons seulement la découverte des corps radioactifs par Becquerel et Pierre et Marie Curie, qui fut l'origine de toutes les recherches ultérieures, et, plus récemment, celle de la radioactivité artificielle par M. et Mme Joliot-Curie. En 1940, les caractères principaux de la fission de l'uranium étaient connus. Mais pour réaliser la bombe atomique, il restait à résoudre un grand nombre de problèmes techniques très difficiles. Il s'est écoulé près d'un siècle entre les travaux d'Ampère et le transport de l'énergie électrique à grande distance. C'est le grand mérite des savants et des ingénieurs américains d'avoir mené à bien en quelques années la tâche gigantesque qui leur était confiée. On doit admirer sans réserve la science et la ténacité dont ils ont fait preuve, la confiance que leur ont témoignée les pouvoirs publics, et les qualités d'organisation de ceux qui ont dirigé l'entreprise. Il serait, d'autre part, injuste d'oublier le concours qu'ont apporté aux Américains des savants européens de premier ordre, soit qu'ils se soient joints volontairement aux savants des Etats-Unis, soit qu'ils aient fui les persécutions raciales.

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET CONSÉQUENCES

Epreuve de la bombe atomique. — La nouvelle bombe fut mise à l'épreuve le 16 juillet 1945, dans une région désertique du Nouveau Mexique, à Alamogordo. Le 14 juillet, l'engin fut placé au sommet d'une tour d'acier. Toute la journée et la suivante furent employées aux préparatifs. Dans la nuit du 15 au 16, les savants et les militaires, qui dirigeaient l'opération, prirent leur poste à une station de contrôle située à une dizaine de kilomètres. L'heure de l'expérience fut fixée à 5 h. 30 du matin. Un éclair prodigieux illumina toute la région, puis on entendit une formidable détonation. Un nuage épais se forma et monta rapidement à une hauteur de 12 km. Par la suite, on put constater que la tour d'acier avait été volatilisée ; à sa place, il n'y avait plus qu'un immense cratère.

Le général Farrell, qui fut un des témoins de l'expérience, dit qu'avant l'explosion la plupart des spectateurs priaient comme ils n'avaient jamais prié de leur vie. Quand l'explosion se produisit, la tension nerveuse, qui était intense dans l'abri, fit place à l'enthousiasme. « En ce coin perdu du désert mexicain, dit le général Farrell, les efforts herculéens de tous ces travailleurs intellectuels et manuels venaient soudain de se cristalliser dans un résultat fantastique... La fission atomique n'était plus cachée dans les formules et dans les rêves des physiciens théoriciens... Nous pensions tous avoir assisté à

la naissance d'un nouvel âge, l'âge de l'Énergie atomique. »

Les bombes lancées sur le Japon. — Trois semaines après l'expérience de Alamogordo, le 6 août 1945, une bombe atomique fut lancée sur la ville japonaise de Hiroshima. Le 9 août, une autre bombe tomba sur la ville de Nagasaki. Le 14 août, les Japonais capitulèrent sans condition. Les États-Unis ont révélé depuis qu'à ce moment ils ne possédaient pas d'autre bombe ; ils avaient dépensé 2 milliards de dollars, soit le prix de neuf jours de guerre.

La surprise fut complète à Hiroshima ; les stations de radar avaient fait connaître que le groupe d'avions ennemis ne contenait que trois avions et on avait cru à un vol de reconnaissance. Elle ne fut pas moins grande à Nagasaki bien que les journaux japonais du 8 août aient fait quelques allusions au désastre de Hiroshima. Dans les deux villes, la bombe éclata à quelques centaines de mètres de hauteur.

D'après le rapport de la mission britannique, Hiroshima comptait au moment de l'attaque environ 245.000 habitants et Nagasaki environ 260.000. Il y eut à Hiroshima soixante-dix mille à quatre-vingt mille personnes tuées et autant de blessées. A Nagasaki, les pertes furent moins graves : trente à quarante mille tués et un nombre à peu près égal de blessés.

Les victimes furent d'abord atteintes par les rayons : rayons infrarouges, rayons de lumière visible, rayons ultraviolets, rayons γ , qui, on le sait, se propagent tous avec la même vitesse d'environ 300.000 km par seconde. Puis vint le souffle de la bombe renversant les maisons ; l'onde sonore compléta le tableau, apportant un formidable bruit d'explosion.

Effets des rayons. — L'effet des rayons visibles, des rayons infrarouges et des rayons ultraviolets fut analogue à celui d'un coup de soleil d'une intensité extraordinaire. Les vêtements de couleur claire constituèrent une protection : des femmes, portant des robes à rayures alternativement noires et blanches, eurent la peau zébrée de brûlures. Certains incendies furent allumés par des substances de couleur sombre faciles à enflammer. A Nagasaki, le rayon de la zone d'incendies provoqués directement par les rayons a dépassé 3 km.

Lorsque l'intensité des rayons γ est affaiblie par la distance, leur effet est insidieux ; ils s'attaquent aux cellules qui produisent le sang. La victime est atteinte à l'état aigu du mal que les radiologistes appellent le mal des rayons ; au bout de quelques jours, elle présente une anémie profonde ; elle meurt généralement par septicémie ou hémorragie. Si elle survit, ses cellules génitales sont le plus souvent touchées ; elle reste stérile.

Le souffle de la bombe. — La bombe ayant éclaté à une hauteur de plusieurs centaines de mètres, le souffle s'exerça presque verticalement près du point de chute ; les toits et les terrasses furent enfoncés. Au contraire, à une grande distance, les plus grands dommages furent infligés aux murs.

Beaucoup de malheureux, qui n'étaient pas morts des rayons, furent écrasés par le souffle ; la pression, qui s'exerça sur eux de l'extérieur, beaucoup plus forte que celle de l'air qui se trouvait à l'intérieur de leur corps, leur aplatit la poitrine. D'autres furent ensevelis sous les décombres.

Les poussières radioactives continuent à exercer leur action longtemps après l'explosion. Les mesures de décontamination se sont montrées peu efficaces.

La ville de Hiroshima, bâtie sur le large delta du fleuve Ota est plate ; les effets de la bombe s'y sont propagés sans rencontrer d'obstacle. Au contraire, la ville de Nagasaki est construite dans deux vallées séparées par une colline abrupte. La colline fit écran et les destructions furent limitées à la vallée où éclata la bombe : de là vint sans doute qu'elles furent moins étendues qu'à Hiroshima.

Il est à remarquer que les abris souterrains ont relativement bien résisté, ainsi que les bâtiments en ciment armé construits spécialement en prévision des tremblements de terre.

La mission anglaise a estimé qu'une bombe, ayant la même puissance que celles de Hiroshima et de Nagasaki et éclatant à la même hauteur, provoquerait l'effondrement des maisons anglaises ordinaires dans un rayon de 1.000 m, les endommagerait sans possibilité de réparations dans un rayon de 1.600 m et les rendrait inhabitables tant qu'elles ne seraient pas réparées dans un rayon de 3 à 4 km. Il suffirait d'un petit nombre de bombes pour détruire une grande ville comme Paris.

Il est d'ailleurs vraisemblable que les bombes employées dans une nouvelle guerre seraient plus puissantes que celles qui ont été lancées sur le Japon.

Dispositions à prendre contre les dangers de la bombe atomique. — Les rapports américains préconisent : la dispersion de la population, la décentralisation des administrations et des hôpitaux, la constitution en différents points de la ville de réserves de produits pharmaceutiques et d'objets de pansement, la construction d'abris souterrains bétonnés et de bâtiments analogues à ceux qui ont été édifiés en Californie pour résister aux tremblements de terre et qui coûtent 10 à 15 % de plus que les

bâtiments ordinaires. Il est également essentiel que les établissements industriels soient disséminés dans tout le pays, au lieu d'être concentrés en un petit nombre de points.

Expérience de Bikini. — La marine américaine ayant décidé d'expérimenter sur les navires la puissance destructive de la bombe atomique, un atoll du Pacifique : Bikini, dans les îles Marshall, fut choisi pour théâtre de l'opération. Deux expériences furent faites au mois de juillet 1946 ; dans la première, la bombe a éclaté à quelques centaines de mètres au-dessus de la mer, dans la deuxième à quelques mètres de profondeur. Elles nécessitèrent l'emploi de cinq cent cinquante techniciens, deux mille sept cents aviateurs, trois cent cinquante militaires de l'armée de terre, trente huit mille trois cent cinquante marins, au total à peu près quarante-deux mille hommes. Elles furent préparées avec le soin le plus minutieux et exécutées dans un ordre impeccable, montrant une fois de plus les grandes qualités d'organisation des Américains. Chaque bateau, soumis à l'épreuve avait été l'objet de mensurations précises ; de nombreux appareils enregistreurs avaient été placés à bord. Sur l'île la plus voisine, à 4 km du centre de la cible, on avait édifié des tours, où l'on avait mis des instruments de mesure, des appareils photographiques et des appareils de cinéma. Après l'explosion, des avions, transformés en laboratoires, survolèrent les lieux ; des canots sans pilote, garnis d'instruments, parcoururent le lagon.

Les bombes étaient chargées avec du plutonium ; leur réglage final parut assez délicat.

L'explosion aérienne eut lieu le 1^{er} juillet 1946. Les observateurs furent placés à 38 km. La bombe, lancée à très grande hauteur par une forteresse volante, éclata à environ 300 m au-dessus de la mer.

On vit apparaître une boule de feu d'environ 4 km de diamètre ; puis un nuage, en forme de champignon, semblable à ceux de Hiroshima et de Nagasaki, atteignit rapidement une altitude de 10.000 m.

Sur une vingtaine de navires se trouvant à une distance de 1.000 m du point de chute, un torpilleur et deux transports de troupes sombrèrent immédiatement ; un deuxième torpilleur et un croiseur coulèrent dans les vingt-quatre heures. Tous les autres navires eurent leurs superstructures très endommagées. Il paraît certain que les rayons et l'onde de choc seraient mortels pour presque tout le personnel placé à moins de 1 km, et encore très dangereux pour le personnel placé à une distance de 1 à 2 km.

La plus grande partie des produits de fission fut entraînée dans le nuage à haute altitude.

L'explosion au-dessous de la surface de l'eau eut lieu le 25 juillet suivant. La bombe fut suspendue sous une péniche à une profondeur d'environ 10 m et la détonation produite par radio. Les observateurs étaient placés cette fois à 18 km. Ils virent une colonne d'eau de 700 m de diamètre monter en quelques secondes à une hauteur de 2.000 m et retomber en pluie. Un cuirassé, trois bateaux plus petits et trois sous-marins coulèrent immédiatement ; un porte-avion, qui se trouvait à 600 m, coula au bout de sept heures et demie ; un cuirassé japonais de 40.000 t coula au bout de cinq jours. On dut remorquer au rivage plusieurs autres navires pour les empêcher de couler. Comme il est naturel, ce furent surtout les coques qui furent endommagées par le choc.

Tandis que, dans la première expérience, les produits de fission avaient été entraînés par le nuage radioactif, dans la deuxième ils retombèrent avec

la pluie provenant de la colonne d'eau. Aussi la radioactivité du lagon et des navires fut-elle beaucoup plus intense et plus persistante. La plupart des navires qui ont été soumis à l'expérience sont, aujourd'hui encore, trop radioactifs pour être occupés : ils doivent être démolis.

Conclusion de l'expérience de Bikini. — Les Américains ont sans doute tiré des conclusions précises de tous les graphiques que leur ont fournis les appareils enregistreurs ; ils ne les ont pas divulguées. En se basant seulement sur les constatations des observateurs, on peut assurer que les effets combinés d'une bombe aérienne et d'une bombe sous-marine ayant seulement la puissance de celles de Bikini, seraient terribles pour les navires de tous types dans un rayon de 1 ou 2 km.

Expériences d'Eniwetok. Superbombes. — De nouvelles expériences ont eu lieu au printemps de 1948 dans l'atoll d'Eniwetok ; mais aucun observateur étranger n'a été admis à y assister. La commission américaine de l'énergie atomique a indiqué, dans son quatrième rapport, que ces expériences ont été faites avec des bombes « d'un nouveau modèle perfectionné ». Le président Truman a déclaré de son côté, le 24 juillet 1948 : « Les récentes expériences faites dans le Pacifique ont montré que nous avons beaucoup amélioré notre position dans le domaine des armes atomiques. » Les journaux américains parlent de superbombes.

Contrôle international de l'énergie atomique. — Pour faire disparaître l'effroyable danger de la bombe atomique, il n'existe qu'un moyen : créer dès le temps de paix une organisation internationale qui rende son emploi impossible. La mise hors la loi de la bombe atomique, l'engagement que pourraient prendre les différents États de ne pas y avoir

recours, seraient des mesures insuffisantes. Les États prennent facilement des engagements, quitte à ne pas les tenir, le moment venu.

Au mois de janvier 1946, le gouvernement américain constitua un Comité chargé d'étudier le problème du contrôle international de l'énergie atomique. La présidence en fut confiée à M. David Lilienthal, directeur de la Tennessee Valley Authority. Il publia son rapport en mars 1946.

L'O. N. U. a créé d'autre part en janvier 1946 une Commission spéciale de l'énergie atomique.

Le Comité Lilienthal a conclu que le contrôle de l'énergie atomique est possible, mais qu'il ne doit pas se borner à des inspections : elles exigeraient trop de qualités de ceux qui en seraient chargés et trop de docilité de ceux qui y seraient soumis. Le Comité propose de confier à un organisme unique où toutes les nations seraient représentées : l'A. D. A. (Atomic-Development Authority), l'exploitation de l'énergie atomique dans le monde, la centralisation des recherches scientifiques sur l'énergie atomique, la découverte des activités clandestines.

L'A. D. A. aurait la propriété de tous les gisements d'uranium et de thorium ; construirait et exploiterait les usines de traitement des minerais et les usines de désintégration ; suivrait de près toutes les recherches sur l'énergie atomique ; donnerait des autorisations pour les applications industrielles ou médicales ; fournirait de l'uranium et du plutonium dénaturés, rendus inutilisables pour la fabrication d'explosifs, par l'addition d'un isotope convenablement choisi.

Une telle organisation suppose l'entente entre tous les peuples et un contrôle efficace de l'énergie atomique obligera les États à abandonner une part de leur souveraineté.

Αππlications pacifiques de l'énergie atomique. —

La pile atomique ne peut fonctionner que si elle a des dimensions supérieures aux dimensions critiques ; elle doit d'autre part être entourée d'écrans très épais qui protègent les usagers contre ses rayons. Aussi ne peut-on actuellement songer à utiliser l'énergie nucléaire pour actionner directement un moteur de faible puissance ni pour entretenir une seule source de chaleur peu importante. L'automobile atomique, l'avion atomique, la cheminée chauffée par quelques petits grains d'uranium sont en dehors des possibilités prochaines. Les paquebots géants et les cuirassés paraissent être les seuls engins de transport qu'il sera peut-être possible de munir dans un avenir peu éloigné de moteurs atomiques (1).

La véritable application industrielle de l'énergie atomique est, pour le moment, la création, dans des régions éloignées de toute agglomération, d'usines alimentant de grandes centrales électriques. Les difficultés techniques ne paraissent pas insurmontables. Reste la question du prix de revient. Il sera surtout grevé par l'amortissement des frais de construction. La purification des matières premières, qui doit être très poussée, est aussi assez onéreuse. D'autre part, le degré d'épuisement de l'énergie de l'uranium, qui pourra être obtenu, aura une grande importance. Le prix du kilowatt-heure atomique paraît devoir être, au début, un peu plus élevé que celui du kilowatt-heure hydraulique ou thermique. Mais il y a lieu de penser que le perfectionnement des dispositifs réduira progressivement les dépenses ; d'autre part, les recettes seront augmentées par la

(1) L'amirauté américaine envisage la construction de navires mus par l'énergie atomique ; sans avoir besoin d'être rechargés, ils auront un rayon d'action à peu près illimité et pourront lancer des bombes atomiques sur tous les points du globe.

vente des produits de fission pour les usages médicaux.

La supériorité de l'énergie nucléaire se manifeste surtout pour les applications où une grande quantité d'énergie doit être libérée par un petit volume de matière. C'est ce qui est réalisé dans la bombe atomique, qui pourra avoir des applications pacifiques, par exemple, pour la modification du profil des terrains.

Minerais d'uranium et de thorium. — Les minerais d'uranium les plus anciennement exploités sont ceux de Joachimsthal en Bohême ; ils servaient à préparer les uranates employés en céramique et en verrerie. Après les découvertes de Pierre et Marie Curie, ils furent traités pour l'extraction du radium. Quand le gouvernement autrichien en eut interdit l'exportation, on chercha de tous côtés de nouveaux gisements : les plus considérables furent trouvés aux Etats-Unis, dans l'Etat du Colorado. De 1912 à 1923, les Etats-Unis furent les principaux fournisseurs de radium. De riches gisements ont été ensuite trouvés au Congo Belge, dans le Haut-Katanga. Depuis 1934, ils sont concurrencés par ceux qui ont été découverts au Canada sur les bords du Grand Lac de l'Ours. Il existe des gisements beaucoup moins riches au Portugal, à Madagascar et en Australie. Dans ces minerais, l'uranium ne se trouve pas à l'état de métal. Le minerai de Joachimsthal contient surtout un oxyde d'uranium, la pechblende ; celui du Canada est surtout formé, de pechblende argentifère ; celui des Etats-Unis de carnotite, vanadate d'uranyle et de potassium ; celui du Haut-Katanga de pechblende mélangée de chalcopite, phosphate d'uranyle et de cuivre. L'autunite, phosphate d'uranyle et de calcium, est le principal minerai des gisements du Portugal et de Madagascar.

Depuis la guerre, des milliers de tonnes de pechblende du Congo belge sont entrés aux Etats-Unis.

Le minerai de thorium le plus répandu est la monazite, phosphate complexe qui se trouve aux Indes, au Brésil et dans l'Amérique du Nord : il a surtout été exploité pour la fabrication des manchons incandescents.

Abondance des minerais d'uranium. — Avant la guerre, le Congo belge produisait à lui seul environ 600 t d'uranium par an ; le Canada en produisait 300 ; la production mondiale pouvait être évaluée à 1.000 t. Elle est certainement beaucoup plus grande aujourd'hui. On peut être assuré que, si une guerre éclatait, l'uranium ne manquerait pas, pour la confection des bombes, aux nations maîtresses des plus importants gisements.

L'uranium est-il assez abondant pour remplacer le charbon comme source d'énergie industrielle ? Un atome d'uranium libérant par sa fission 200 MeV, on calcule aisément que la fission de 1 kg d'uranium libère une quantité d'énergie d'environ 19 milliards de calories-kilogramme, c'est-à-dire celle qui résulte de la combustion de 2.400 t. de charbon pur ou de houille ayant un pouvoir calorifique moyen. La fission de 1.000 t serait équivalente à la combustion de 2.400 millions de tonnes de charbon. Comme la production mondiale de charbon a été en 1938 de 1.277 millions de tonnes, on voit qu'il suffirait d'obtenir par les piles environ la moitié de l'énergie susceptible d'être dégagée par la fission, pour qu'une production annuelle de 1.000 t d'uranium puisse fournir autant d'énergie que le charbon en fournit aujourd'hui. Le charbon consommé par an en France correspond à quelques dizaines de tonnes d'uranium seulement.

Les réserves d'uranium, qui se trouvent dans les

gisements en exploitation, ne peuvent être évaluées que d'une manière approximative. D'après le physicien australien Oliphant, il y aurait assez d'uranium et de thorium dans les gisements connus pour approvisionner le monde d'énergie pendant une centaine d'années. L'énergie atomique n'apporterait ainsi aux hommes qu'une aide relativement courte.

Mais de grands efforts sont faits pour découvrir de nouveaux gisements.

D'autre part et surtout, il est extrêmement probable que bien avant qu'un siècle se soit écoulé, les savants auront trouvé le moyen d'obtenir de l'énergie nucléaire utilisable à partir d'éléments plus abondants que l'uranium et le thorium.

Secret des recherches atomiques. — La publication des travaux sur l'énergie atomique a été interdite pendant la guerre ; l'interdiction subsiste encore aujourd'hui. Les grands centres d'études travaillent isolément dans le secret.

Les savants ont toujours tenu à faire profiter de leurs travaux toute la communauté humaine ; au contraire, les Etats n'ont jamais autorisé la divulgation des applications de la science à des fins militaires. Dans le domaine de l'énergie atomique, les travaux scientifiques et leurs applications se pénètrent et leur distinction n'a pas été établie.

Conscients de leur responsabilité, de nombreux savants, isolément ou en groupe, ont protesté contre cette situation nouvelle, très défavorable aux progrès de la science. Ils n'en sont pas moins tenus d'observer les règles qui leur sont imposées. Ils ne peuvent que chercher à éclairer l'opinion publique et faire tous leurs efforts pour qu'une organisation internationale des recherches atomiques dissipe l'atmosphère de méfiance.

Si les Etats ne parviennent pas à se mettre d'ac-

cord, il est certain que, d'ici cinq à vingt ans, toutes les grandes nations, qui voudront y mettre le prix, pourront réaliser une bombe atomique ; toutefois, l'une d'entre elles pourra conserver ou acquérir de l'avance sur les autres.

Influence de la bombe atomique sur l'esprit public. — Jusqu'à la dernière guerre, l'homme moderne était très fier des découvertes scientifiques de son temps. Oubliant ce que les générations actuelles doivent à celles qui les ont précédées, et n'ayant pas médité la parole du philosophe : « Celui qui a inventé la charrue laboure invisible à côté du laboureur », il avait un peu de dédain pour les siècles passés. Le progrès par la science était pour lui hors de discussion. La bombe atomique et tous les perfectionnements de l'art de tuer ont jeté le doute dans son esprit. Beaucoup ne sont pas éloignés de croire qu'il y a deux espèces de savants, ceux qui se consacrent à l'amélioration du sort de l'humanité et ceux qui poursuivent des fins destructrices. Ils ne comprennent pas que la même découverte est susceptible d'avoir les applications les plus utiles et les conséquences les plus terribles. Certes, les savants ne peuvent rester indifférents quand le sort de leur pays est en jeu ; mais ce n'est pas à eux qu'il faut imputer la folie des hommes ni leur frénésie de domination.

Des littérateurs se sont réjouis que l'opinion soit maintenant moins assurée du rôle bienfaisant de la science. Ce qu'ils n'ont pas compris, eux, c'est la grandeur du secret qui a été conquis. L'homme, qui a si longtemps tremblé devant un monde hostile, est parvenu à se rendre maître des réserves d'énergie prodigieuses qui se cachent dans l'atome. Une étape décisive a été franchie dans la connaissance et la domination de l'univers.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
CHAPITRE PREMIER. — Premières données sur la constitution des atomes et sur l'énergie atomique.....	5
Classification périodique des éléments (5). — L'électricité et la matière (7). — Radioactivité (18).	
CHAPITRE II. — Constitution de l'atome	27
Appareils de détection (27). — Principaux corpuscules (30). — Structure de l'atome (33). — Les isotopes (43).	
CHAPITRE III. — Transmutation d'éléments. Energétique nucléaire	54
Transmutation d'éléments (54). — Energétique nucléaire (73).	
CHAPITRE IV. — Utilisation de l'énergie nucléaire. Fission de l'uranium. Bombe atomique. Pile atomique..	86
CHAPITRE V. — Résultats et conséquences	115



024000028222

Que sais-je?

Catalogue général (suite)

- 1 } Voir la liste
à 126 } en page 2
127. Histoire de la Normandie.
128. La littérature du siècle philosophique.
129. La diplomatie française.
130. Les étapes de la mécanique.
131. L'orfèvrerie.
132. La vie au moyen âge
133. Physiolog. du sport
134. Les techniques de la métallurgie.
135. Les estampes.
136. Le caoutchouc.
137. Hist. de la justice.
138. Les messages de nos sens.
139. Le café.
140. Hist. de la Suisse.
141. L'origine des espèces.
142. La Révolution française.
143. Forêts vierges et bois coloniaux.
144. Histoire de l'Auvergne.
145. La littérature française du Moyen Age.
146. Les races humaines.
147. Histoire de la Bretagne.
148. La population.
149. Histoire de la Provence.
150. Les grands explorateurs.
151. Hist. de la Savoie.
152. La vie des aveugles.
153. L'affiche.
154. Les alcaloïdes et les plantes alcaloïfères.
155. L'unité française.
156. La littérature du siècle romantique.
157. Les Croisades.
158. Le pétrole.
159. La littér. anglaise.
160. Hist. du théâtre.
161. L'occultisme devant la science.
162. Les constitutions de la France.
163. La chimie des êtres vivants.
164. Hist. du travail.
165. Les étapes de l'astronomie.
166. La médecine du travail.
167. Les étapes de la langue française.
168. La numismatique antique.
169. Les avions.
170. La phillos. française
171. Les climats et l'organisme humain.
172. Les étapes de l'aviation.
173. Les alliages métalliques.
174. La photographie et ses applications.
175. L'électron et son utilisation industrielle
176. Les noms de lieux.
177. Histoire du ballet.
178. Les régimes alimentaires.
179. L'économie de l'U. R. S. S.
180. Histoire du syndicalisme français.
181. Le moteur vivant.
182. Les grands problèmes de l'économie contemporaine.
183. Hist. de l'U. R. S. S.
184. La physique de la vie
185. Les civilisations anciennes du Proche-Orient.
186. Histoire de l'Allemagne.
187. L'urbanisme.
188. La psycho-physiologie humaine.
189. L'anal. chimique.
190. Les Jacobins.
191. L'économie française dans le monde.
192. La chasse en plaine et au bois.
193. Le charbon.
194. Le sang.
195. Le droit romain.
196. Techn. de la danse.
197. Géographie sociale du monde.
198. Histoire du calcul.
199. Les pêches maritimes.
200. Histoire des postes jusqu'à la révolution.
201. Genèse de la flore terrestre.
202. Les singes anthropoïdes.
203. Le calendrier.
204. Les procédés modernes de construction
205. La baleure animale
206. Hist. des Gaulois.
207. La chimie générale.
208. Les vins de France.
209. La papauté contemporaine.
210. L'Intelligence.
211. Jeanne d'Arc.
212. Géographie agricole du monde.
213. Le peuple des termites.
214. Les stations de radiodiffusion.
215. La sélect. animale.
216. Les orig. de Rome.
217. Séismes et volcans.
218. La psychologie appliquée.
219. La sélection végétale.
220. Le secret des coul.
221. Psychoses et névroses.
222. Hist. de l'Autriche.
223. L'économie des Etats-Unis.
224. Les grandes migrations.
225. Les étapes de la logique.
226. Les pays légendaires.
227. La littér. grecque.
228. Hist. du Dauphiné.
229. Les eaux minérales et l'organisme humain.
230. Le soleil et son rayonnement.
231. La vie dans la Grèce classique.
232. Hist. du Canada.
233. La vie dans les eaux douces.
234. Les corps gras.
235. Les noms de personnes.
236. La mort.
237. Les fruits coloniaux.
238. L'éduc. physique.
239. L'industrie du gaz.
240. Catalyse et catalyseurs.
241. Histoire des noirs d'Afrique.
242. La vie rurale en France.

Suite page 4
de la couverture

Que sais-je?

Collection dirigée par Paul Angoulvent

Catalogue général (suite)

- 1 } Voir les listes
à 242 } en pages 2 et 3
243. Electricité, magnétisme.
244. Les mesures physiques.
245. Médicaments et médicaments.
246. Géographie industrielle du monde.
247. L'Égypte ancienne.
248. Hist. de la Russie des origines à 1917.
249. Le chauffage des habitations.
250. La philos. antique.
251. Le téléphone.
252. La douleur.
253. L'existentialisme.
254. Hist. du scoutisme.
255. Hist. de l'Alsace.
256. La graphologie.
257. Hist. de la police.
258. Cuirs et peaux.
259. Poudres et explosifs.
260. Histoire des postes depuis la Révolution.
261. La chaleur.
262. Hist. de la Corse.
263. Le piano.
264. Le verre.
265. La seconde guerre mondiale.
266. L'eau.
267. Les instruments à vent.
268. Histoire de la Franche-Comté.
269. Les origines de la bourgeoisie.
270. Vie et mort des mots.
271. Origine des animaux domestiques.
272. Les instruments du quatuor.
273. Histoire du timbre-poste.
274. La publicité.
275. Hist. de l'Espagne.
276. L'orgue.
277. Physionomie et caractère.
278. L'opéra et l'opéra-comique.
279. La civilisation de 1960.
280. La cellule photo-électrique.
281. La statistique.
282. Histoire de la Grande-Bretagne.
283. L'économie de l'Europe centrale germanique.
284. La grande industrie chimique minérale.
285. L'inconscient.
286. Histoire de l'Italie.
287. La physiologie végétale.
288. Le chant choral.
289. Les régimes politiques.
290. La littérature russe.
291. Matière, électricité, énergie.
292. Babylone.
293. Le son.
294. La sécurité sociale.
295. La Révolution de 1848.
296. La littér. chinoise.
297. Le crime.
298. Hist. de l'armée.
299. La découverte des mers.
300. Le marxisme.
301. Hist. de l'armement.
302. La psychotechnique.
303. La question arabe.
304. Hist. des doctrines politiques en France.
305. Le riz.
306. Psychologie militaire.
307. Hist. diplomatique.
308. Histoire de la Chine moderne.
309. Histoire de la mise en scène.
310. Hist. de l'éducation.
311. La mécanique ondulatoire.
312. Les plastiques.
313. Géographie botanique.
314. Les Gallo-romains.
315. Le capitalisme.
316. Les moteurs.
317. L'énergie atomique.
318. La Tunisie.
319. Hist. de la Belgique.
320. Les impérialismes antiques.
321. La chasse en montagne, au marais et en mer.
322. Les sentiments.
323. Les phénomènes vibratoires.
324. Langue et littérature d'oc.
325. Les sports de la montagne.
326. La première guerre mondiale.
327. La littérature latine.
328. L'économie de l'Europe centrale slave et danubienne.
329. L'économie planifiée.
330. La vie et la mort des étoiles.
331. Le clavecin.
332. Histoire du Poitou.
333. Physiologie de la conscience.
334. Hist. du Commonwealth britannique.
335. Les télécommunications.
336. Le blason.
337. Histoire du sport.
338. Histoire des ordres religieux.
339. Le sel.
340. Carthage.
341. Les classes sociales.
342. Histoire de la marine française.
343. L'économie mondiale.
344. Odeurs et parfums.
345. La Renaissance.
346. L'éclairage.
347. Le siècle de Périclès.
348. Le pilotage des avions modernes.
349. Le travail ouvrier.
350. La mémoire.

1949 - Imp. PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE - Vendôme (France)