



**HAL**  
open science

## L'isotopie et les isotopes

Mme Pierre Null Curie

► **To cite this version:**

Mme Pierre Null Curie. L'isotopie et les isotopes. Journal de Physique et le Radium, 1923, 4 (11), pp.381-412. 10.1051/jphysrad:01923004011038100 . jpa-00205111

**HAL Id: jpa-00205111**

**<https://hal.science/jpa-00205111>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

## LE RADIUM

L'ISOTOPIE ET LES ISOTOPES<sup>(1)</sup>par M<sup>me</sup> PIERRE CURIE

## A. — L'ISOTOPIE CHEZ LES RADIOÉLÉMENTS.

1. **La classification périodique des éléments.** — Le phénomène *d'isotopie*, mis en évidence par les travaux des 15 dernières années, se rattache étroitement à la classification périodique des éléments. En 1914, F. Soddy désigna comme *isotopes* les éléments dont les propriétés chimiques sont si voisines qu'il convient de leur assigner une place unique dans la classification, bien que leurs poids atomiques puissent différer de plusieurs unités.

Rappelons brièvement le principe de la classification. Les éléments sont rangés par ordre de poids atomiques en lignes et en colonnes (tableau I); dans chacune des 8 colonnes du tableau, numérotées de 0 à VII, se trouvent réunis des éléments de même valence et de nature chimique analogue; cette analogie devient plus apparente quand on fait alterner les termes d'une même colonne à partir du 3<sup>e</sup> rang, en les plaçant alternativement à droite et à gauche, de manière à réaliser une bifurcation. Certains groupes d'éléments jouent un rôle spécial, tel le groupe des terres rares dont les termes successifs ont des propriétés chimiques très voisines. Une colonne supplémentaire VIII se compose de 3 groupes d'éléments dont chacun joue en quelque sorte le rôle d'un élément unique, comme celui des terres rares. Il existe aussi dans la classification un certain nombre de places encore vides, bien que le tableau ait été complété successivement par la découverte de plusieurs éléments nouveaux, en particulier par celle des *radio-éléments* qui sont venus se placer dans les deux dernières rangées.

La classification ainsi constituée a un sens philosophique profond qui a été mis en évidence par les progrès de la physique moderne, en ce qui concerne les idées relatives à la structure des atomes. Les expériences de E. Rutherford sur la dispersion des rayons  $\alpha$  l'ont amené à considérer

<sup>(1)</sup> Cet article correspond aux conférences-rapports sur le même sujet.

TABLEAU I  
Classement périodique général.

	O	I	II	III	IV	V	VI	VII					
1 H 1,008													
2	3 He 4,00	4 Li 6,94	5 Be 9,1	6 B 10,9	7 C 12,00	8 Az 14,01	9 O 16,00	10 F 19,0					
10	11 Ne 20,2	12 Na 23,00	13 Mg 24,32	14 Al 26,96	15 Si 28,3	16 P 31,04	17 S 32,06	18 Cl 35,46					
18	19 A 39,9	20 K 39,10	21 Ca 40,07	22 Sc 45,1	23 Ti 48,1	24 Va 51,0	25 Cr 52,0	26 Mn 54,93	27 Fe 55,84	28 Co 58,97	29 Ni 58,68		
		30 Cu 63,57	31 Zn 65,37	32 Ga 70,10	33 Ge 72,5	34 As 74,96	35 Se 79,2	36 Br 79,92					
36	37 Kr 82,92	38 Rb 85,45	39 Sr 87,63	40 Yt 89,33	41 Zr 90,6	42 Nb 93,1	43 Mo 96,0	44 —	45 Ru 101,7	46 Rh 102,9	47 Pd 106,7		
		48 Ag 107,88	49 Cd 112,40	50 In 114,8	51 Sn 118,7	52 Sb 120,2	53 Te 127,5	54 I 126,92					
54	55 Xe 130,2	56 Cs 132,81	57 Ba 137,37	58 La 139,0	59 Ce 140,25	60 Pr 140,6	61 Nd 144,3	62 —	63 Sm 150,4	64 Eu 152	65 Gd 157,3	66 Tb 159,2	
66	67 Ds 162,5	68 Ho 163,5	69 Er 167,7	70 Tu 168,5	71 Yb 173,5	72 Lu 175,0	73 Ct ?	74 Ta 181,5	75 W 184,0	76 —	77 Os 190,9	78 Ir 193,1	79 Pt 195,2
		80 Au 197,2	81 Hg 200,6	82 Tl 204,0	83 Pb 207,2	84 Bi 209,0	85 Po 210	86 —					
	87 EmRa 222	88 —	89 Ra 226	90 Ac 226?	91 Th 232,1	92 Pa 230?	93 Ur 238,2						

chaque atome comme composé d'un *noyau* à charge positive, entouré d'un groupement de  $N$  électrons dont la charge totale  $Ne$  égale en valeur absolue celle du noyau ( $e$  étant la charge de l'électron, ou charge élémentaire). Les recherches importantes de Moseley ont montré que, pour chaque atome, le nombre  $N$  d'unités de charge positive du noyau représente précisément le numéro d'ordre de la place occupée par l'élément dans la classification générale. La méthode de Moseley, qui consiste à déterminer

la fréquence des rayons X caractéristiques que peut émettre un élément, est devenue une véritable méthode d'analyse chimique, qui permet de définir sans ambiguïté un *type chimique* déterminé, auquel correspond la valeur  $N$  du *nombre atomique*. Les travaux de Bohr ont puissamment contribué à développer la théorie de l'atome à noyau positif central et à en tirer les conséquences très étendues qu'elle comporte. L'atome Rutherford-Bohr s'est montré apte à rendre compte de l'émission des spectres de raies, et Bohr a pu développer des spéculations du plus haut intérêt sur la distribution et le mouvement des électrons qui entourent le noyau. On admet actuellement que ces électrons forment des groupes, caractérisés par une distance moyenne plus ou moins grande du noyau. C'est le groupe extérieur qui détermine les propriétés chimiques et la valence; celle-ci est mesurée par le nombre des électrons superficiels, qui varie depuis un pour les métaux alcalins jusqu'à huit pour les gaz inertes.

Avant la découverte des radioéléments nouveaux, la dernière rangée du système périodique ne comprenait que deux éléments, l'uranium et le thorium, ayant les poids atomiques les plus élevés (238, 18 et 232, 12). Lors de la découverte du radium, il a été prouvé que cet élément vient occuper dans la dernière rangée la place qui convient à l'homologue supérieur du baryum, avec le nombre atomique 88. La nouvelle méthode d'analyse chimique basée sur la radioactivité a permis de découvrir plus de 30 radioéléments nouveaux qui tous éprouvent, au cours du temps, une destruction progressive et spontanée. Le nombre de ces substances apparaissait d'abord comme une menace à la généralité du classement: toutefois cette difficulté a été levée de la plus heureuse manière, et c'est précisément l'effort qu'il a fallu accomplir dans cette direction qui a conduit à concevoir et à établir la notion fondamentale d'isotopie.

2. — **Les familles des radioéléments.** — Rappelons qu'en vertu des lois de leur évolution les radioéléments forment des familles, dont les termes sont reliés les uns aux autres par un processus de filiation. Ces familles sont au nombre de trois, les trois têtes de série étant l'uranium, le thorium et l'actinium; cependant on admet actuellement que la famille de l'actinium se rattache à celle de l'uranium. Les trois familles ont été représentées dans le tableau II; pour chaque corps, on a indiqué la valeur de la *période* ou temps nécessaire pour que la quantité de la substance considérée diminue de moitié, en vertu de la loi fondamentale des transformations radioactives. Pour chaque corps on a indiqué aussi le mode de rayonnement  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ , qui caractérise le mode de transformation. Une

TABLEAU II.

<p style="text-align: center;">Ur I 4,37.10<sup>9</sup>a. G de Ur ↓α Ur X<sub>1</sub> 23,8j. " " Th ↓β Ur Z Ur X<sub>2</sub> 1,15m. " " Pa 6, 7h. ↓βγ Ur II 1.10<sup>6</sup>a. " " Ur ↓α Ur Y Io 6,9.10<sup>4</sup>a? " " Th 24,6h. ↓α Ra 1610a. " " Ra ↓αβ Em Ra 3,85j. " " Em Ra ↓α Ra A 3,0m. " " Po ↓α Ra B 26,8m. " " Pb ↓βγ Ra C 19,5m. " " Bi 1,4m. ↓α Ra C' 10<sup>-6</sup>sec? " " Po? G du TI ↓β ↓β Ra D 16,5a. " " Pb ↓β Ra E 4,85j. " " Bi ↓βγ Po 140j. " " Po ↓α Pb?</p> <p style="text-align: center;"><i>Famille Uranium-Radium</i></p>	<p style="text-align: center;">Thorium 1,61.10<sup>10</sup>a. " Th ↓α M th I 6,7a. " Ra ↓? M th II 6,2h. " Ac ↓βγ Ra th 1,9a. " Th ↓α Th X 3,64j. " Ra ↓αβ Em Th 54s. Em Ra ↓α Th A 0,14s. " Po ↓α Th B 10,6h. " Pb ↓β Th C 60m.8 " Bi 3,1m. ↓α Th C' 10<sup>-11</sup>sec? " Po G du TI ↓βγ ↓?</p> <p style="text-align: center;"><i>Famille Thorium</i></p>	<p style="text-align: center;">Pa 1,2.10<sup>4</sup>a. " Pa ↓α Ac 20a. " Ac ↓? Ra Ac 18,9j. " Th ↓αβ Ac X 11,2j. " Ra ↓α Em Ac 3,9sec. Em Ra ↓α Ac A 0,002sec. " Po ↓α Ac B 36,1m. " Pb ↓β Ac C 2,15m. " Bi 4,7m. ↓α Ac C' Ac C' 5,10<sup>-3</sup>s. " Po G du TI ↓βγ ↓?</p> <p style="text-align: center;"><i>Famille Actinium</i></p>
--	--	---

émission de rayons  $\alpha$  consiste en une expulsion d'un noyau d'hélium par le noyau primitif, d'où, pour l'atome résultant, une diminution de 4 unités pour le poids atomique ( $\text{He} = 4$ ) et une diminution de 2 unités pour le nombre atomique  $N$ , puisqu'un noyau d'hélium porte 2 unités de charge positive ( $N = 2$ ). Une émission de rayons  $\beta$  correspond à l'émission par le noyau d'un électron constitutif; l'atome résultant a un poids atomique sensiblement égal à celui de l'atome primitif puisque la masse d'un électron est extrêmement faible, mais le nombre atomique  $N$  de cet atome résultant est plus élevé d'une unité que celui de l'atome primitif, puisque le noyau a perdu une unité de charge négative. L'émission de rayons  $\gamma$  accompagne celle de rayons  $\beta$  et ne représente pas un troisième mode de transformation. Dans certains cas, celle-ci est multiple et donne lieu à une bifurcation, une substance se transformant en partie par émission de rayons  $\alpha$ , en partie par émission de rayons  $\beta$ .

L'examen du tableau II fait ressortir l'analogie profonde qui existe dans la succession des transformations pour les trois familles. Cette analogie apparaît clairement dans l'existence de trois gaz radioactifs ou *émansations*. A partir de ces termes gazeux (symboles, Rn, An, Tn), on voit le

même mode d'évolution à quatre termes se répéter trois fois, les termes qui se correspondent étant caractérisés par une émission de rayons de même espèce. A cette analogie de rayonnement correspond, dans chaque cas, une analogie très étroite dans les propriétés chimiques et électrochimiques.

3. — **Chimie et électrochimie des radioéléments.** — A part l'uranium et le thorium, les éléments radioactifs ne peuvent être étudiés qu'à l'aide de méthodes spéciales basées sur la mesure du rayonnement. Ces substances, en effet, ne sont en général soumises à l'expérimentation qu'en quantité très faible, inaccessible à la balance. De tous les radioéléments nouveaux, le radium seul a pu être pesé à l'état de sel pur, bien qu'il n'en existe qu'environ 3 décigrammes par tonne dans les meilleurs minerais. La concentration des autres radioéléments est encore bien plus faible que celle du radium.

Malgré cette dilution extrême, les radioéléments ont des propriétés chimiques et électro-chimiques définies au même titre que celles des éléments ordinaires. On peut les soumettre à des précipitations et à des cristallisations en présence de diverses autres matières avec lesquelles ils manifestent une parenté plus ou moins profonde. On peut aussi les déposer de leur solution sur des électrodes en vue de déterminer leur potentiel électrochimique, ou encore les soumettre à la distillation. Enfin, la mesure du coefficient de diffusion et de la mobilité des ions radioactifs électrolytiques permet de déterminer leur valence.

Toutes ces méthodes de recherche ont été mises en œuvre pour préciser l'individualité des radioéléments ; elles ont conduit à des résultats imprévus. En effet si, d'une part, certains radioéléments ont été reconnus comme représentant des types chimiques nouveaux, tels le radium, l'actinium, le polonium, l'émanation du radium et le protactinium, d'autres, par contre, ont manifesté des propriétés tout à fait voisines de celles de quelques éléments inactifs ; ainsi le radium D ou radioplomb a une analogie étroite avec le plomb ordinaire, le radium E avec le bismuth, le thorium C'' et l'actinium C'' avec le thallium. Cette analogie offre un caractère particulier ; elle est en quelque sorte d'un ordre plus élevé que celle qui existe entre les corps homologues d'une même colonne, ou encore entre les éléments qui composent le groupe des terres rares, ou l'un des trois groupes de la colonne VIII. En effet, on peut séparer les éléments de ces groupes par des méthodes chimiques plus ou moins laborieuses, tandis que l'on ne réussit pas à séparer le radium D du plomb ni le radium E du bismuth.

On voit par là comment ce nouveau mode de parenté chimique est intervenu directement dans les essais d'isolement des radioéléments nouveaux. On cherche fréquemment à préparer ces derniers à partir de minéraux dont la composition chimique est très complexe. Le processus de purification d'un radioélément donné peut se trouver arrêté par suite de la présence de la substance dont il est chimiquement inséparable, et c'est cette circonstance qui a jusqu'ici réduit à néant les efforts dépensés pour isoler certains corps à vie moyenne suffisamment longue, tels que l'ionium ou le radium D.

L'intérêt considérable qui s'attachait à l'isolement des radioéléments nouveaux, a fait entreprendre un grand nombre de recherches dans cette voie. Excepté dans le cas du radium et dans celui de son émanation, ces recherches se sont jusqu'ici toujours heurtées soit à la destruction trop rapide de la matière considérée, soit à sa ressemblance avec quelque autre matière, faisant échouer tout essai de séparation. Cette ressemblance apparaît non seulement entre certains radioéléments et les matières inactives, mais aussi entre radioéléments eux-mêmes: ainsi le radium et le mésothorium ne peuvent être séparés par des réactions chimiques, bien que leur vie moyenne, leurs propriétés radioactives, leur filiation et leur mode de transformation soient entièrement différents.

On conçoit combien une telle situation a pu paraître paradoxale et quel intérêt elle pouvait exciter. Ce fut le mérite considérable de F. Soddy d'avoir le premier clairement réalisé dès 1910, que cette parenté chimique, si gênante à certains points de vue pour la chimie des radioéléments, est d'une nature différente et d'un ordre de grandeur différent que les analogies chimiques jusqu'alors observées; autrement dit la ressemblance entre le radium D et le plomb ou bien entre le radium et le mésothorium n'est pas seulement d'un degré plus élevé que celle entre les terres rares, mais elle est d'une tout autre origine. Aux éléments qui manifestent entre eux cette relation particulière, F. Soddy donna en 1914 le nom d'*isotopes*. Il supposa, de plus, que les éléments isotopes ont non seulement les mêmes propriétés chimiques mais aussi le même spectre; conformément à cette prévision, un mélange de thorium et d'ionium, à 30 0/0 d'ionium (d'après une estimation basée sur les théories de la radioactivité), donne le même spectre que le thorium pur, bien que le poids atomique soit différent (231,51 au lieu de 232,12).

La notion d'isotopie, ainsi née de la chimie des radioéléments, a été ensuite rattachée à la conception du noyau atomique. On sait aujourd'hui que *les éléments isotopes sont ceux qui possèdent la même charge nucléaire.*

Ce lien fondamental leur assure *le même type chimique* et la même place dans le système périodique. Un mélange d'isotopes se comporte donc comme un élément unique dont le poids atomique résulte d'une moyenne de ceux des constituants. Par suite, les poids atomiques que détermine la chimie n'ont pas, en général, de signification simple; c'est ce qui explique l'impossibilité où se sont trouvés les chimistes d'établir entre ces nombres les relations simples, prévues dès les origines de la chimie par la théorie de l'unité de la matière. Ainsi que l'avait supposé F. Soddy, le phénomène d'isotopie n'est pas limité aux radioéléments mais se présente comme un phénomène général, ce qui en élargit considérablement la portée philosophique.

4. **Groupes de radioéléments isotopes.** — Le premier service signalé, rendu par la notion d'isotopie, a été de permettre l'introduction de tous les radioéléments dans le système périodique. Il suffit, en effet, d'assigner une seule place à un groupe d'isotopes, quel que soit leur nombre. Le choix de cette place a été facilité par les *lois de déplacement de valence* établies indépendamment par F. Soddy et par K. Fajans et se résumant ainsi :

1° Quand un atome se transforme avec émission d'une particule  $\alpha$ , la valence de l'atome résultant est inférieure de deux unités à celle de l'atome primitif, ce qui équivaut à un recul de deux places dans la classification périodique.

2° Quand un atome se transforme avec émission d'une particule  $\beta$ , la valence de l'atome résultant est supérieure d'une unité à celle de l'atome primitif, ce qui équivaut à une avance d'une place dans le système périodique.

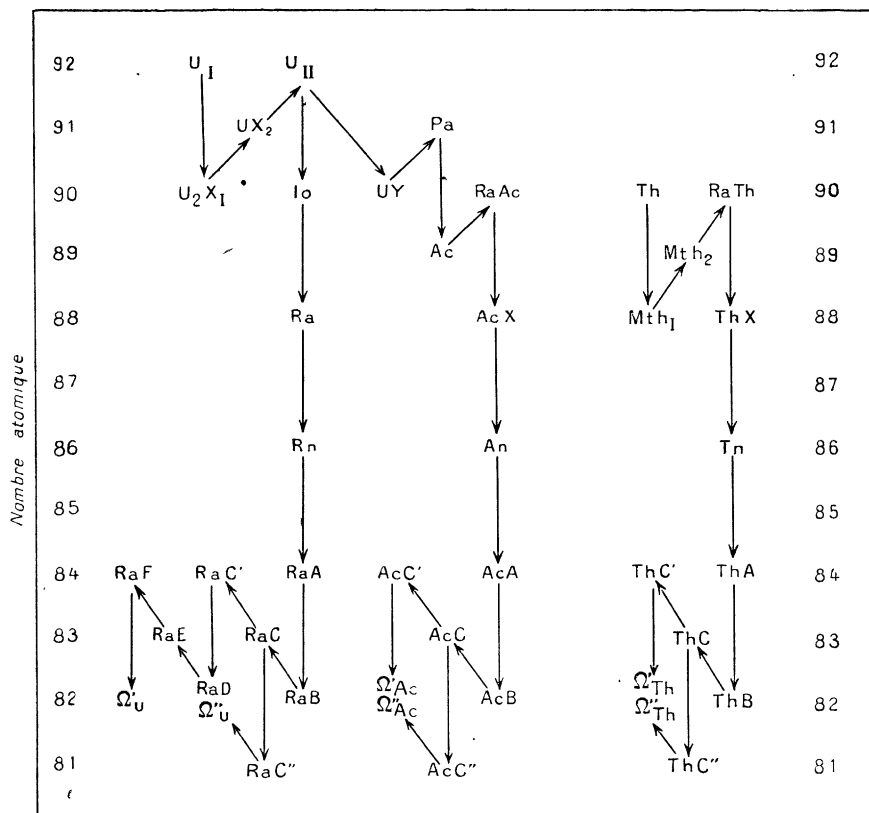
Ces lois à base expérimentale peuvent être considérées actuellement comme le simple énoncé du fait que la charge nucléaire diminue de deux unités par émission d'une particule  $\alpha$ , et augmente d'une unité par émission d'une particule  $\beta$ . La valence aussi diminue de deux unités dans le premier cas, et augmente d'une unité dans le second cas, car elle est déterminée par le nombre des électrons superficiels, et qu'un atome dont la charge nucléaire a été modifiée doit, pour rester neutre, gagner ou perdre autant d'électrons superficiels qu'il a gagné ou perdu d'unités de charge positive nucléaire.

A l'aide des considérations qui précèdent, tous les radioéléments se classent en 10 groupes, qui occupent dans le système périodique 10 places depuis  $N=81$  (thallium) jusqu'à  $N=92$  (uranium); les places 85 et 87



sont inoccupées. Chaque famille radioactive offre une succession de termes que l'on peut suivre à travers les places successivement occupées.

TABLEAU III.



Il convient d'insister plus particulièrement sur le groupe des isotopes du type plomb, en raison de l'importance des recherches qui se rattachent à ce groupe. Celui-ci comprend les termes ultimes de la transformation radioactive des trois familles; ces termes sont désignés par les lettres Ω' et Ω''. Pour la famille uranium-radium, le terme Ω' est seul important : c'est le *plomb d'uranium* ou radium G; son poids atomique prévu d'après les règles des transformations radioactives est 206. Pour la famille du thorium, les termes Ω' et Ω'' correspondent au même poids atomique 208 qui caractérise le *plomb de thorium*. On peut espérer trouver le plomb d'uranium dans les minerais d'urane exempts de thorium, et le plomb de thorium dans les minerais de thorium sans urane. Cette théorie a été entièrement confirmée par la détermination directe du poids atomique du plomb extrait de divers minéraux radioactifs (Soddy, Richards, Honigschmid, Maurice

Curie, etc...) Il a été prouvé, en même temps, que les plombs isotopes possèdent le même volume atomique, la même température de fusion, le même potentiel électrochimique, la même conductibilité, le même pouvoir thermoélectrique. Ils ne diffèrent que par le poids atomique et la densité; de très petites différences dans leurs spectres ont pu être mises en évidence par la méthode interférentielle (Merton). La teneur des minéraux radioactifs en plomb permet de calculer, sous certaines réserves, l'âge géologique du minerai.

#### B. LES RAYONS POSITIFS ET L'ANALYSE DES MASSES.

**1. Production et propriétés des rayons positifs.** — Les rayons positifs dont la découverte est due à Goldstein sont produits, en même temps que les rayons cathodiques, dans un tube à gaz raréfié traversé par un courant électrique de haute tension. Alors que les rayons cathodiques sont constitués par des électrons émis à la surface de la cathode et accélérés par le champ qui existe devant celle-ci, dans l'espace sombre de Crookes, les rayons positifs sont, au contraire, constitués par des ions à charge positive se dirigeant vers la cathode, et prenant naissance en divers points de l'espace sombre. Pour soumettre ces rayons à l'observation, il est nécessaire de les faire passer au delà de la cathode, en utilisant des trous ou des canaux ménagés dans celle-ci. Les particules à charge positive qui pénètrent au travers de ces orifices dans une chambre d'observation située derrière la cathode, ont reçu primitivement le nom de *rayons canaux*.

L'étude de ces rayons a été particulièrement développée par Wien et par J.-J. Thomson, et il a fallu pour cela surmonter de grandes difficultés. Les méthodes employées consistent, en principe, à déterminer, pour un fin pinceau de rayons, les déviations résultant de l'application, sur une certaine longueur de trajet, d'un champ magnétique ou d'un champ électrique perpendiculaires à la direction primitive du faisceau. La déviation subie par celui-ci (déviation magnétique ou déviation électrique) peut être observée sur un écran phosphorescent à la willémite ou sur une plaque photographique. La déviation magnétique  $z$  est proportionnelle au produit  $e/mv$ , ou  $m$  est la masse de la particule chargée,  $e$  sa charge et  $v$  sa vitesse. La déviation électrique  $y$  est proportionnelle au produit  $e/mv^2$ . La détermination de  $z$  et de  $y$  permet de calculer le rapport  $e/m$  et la vitesse  $v$  des rayons.

Ces principes bien connus, applicables non seulement aux rayons positifs mais aussi aux rayons cathodiques, ont permis d'établir que ces derniers sont des électrons en mouvement, et que le rapport de leur charge à leur masse est environ 1800 fois plus grand que celui qui convient à l'hy-

drogène électrolytique. On en a conclu que la masse d'un électron est environ 1800 fois plus petite que celle d'un atome d'hydrogène ; mais on sait aussi que cette masse  $m$  est une fonction de la vitesse, qui grandit avec celle-ci selon la formule de Lorentz-Einstein :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

où  $m_0$  est la masse limite pour les vitesses faibles et  $\beta$  le rapport de la vitesse des rayons à celle de la lumière.

Si l'élément d'électricité négative est unique et ne constitue qu'une petite fraction du plus petit des atomes, l'électricité positive, au contraire, est transportée par des particules de masses diverses, et la détermination du rapport  $e/m$  a permis d'établir que ces particules sont des atomes ou des molécules.

Les rayons corpusculaires positifs subissent une absorption considérable, même dans les gaz sous basse pression. De plus, les particules à charge positive, qui forment ces rayons, sont susceptibles de se recombiner avec des électrons qu'elles rencontrent, de manière à neutraliser leur charge. Pour ces raisons, les expériences de déviation magnétique et électrique n'ont point donné, tout d'abord, des résultats d'interprétation facile. Pour obtenir des conditions plus simples, il a fallu réaliser un vide très parfait dans la chambre d'observation où s'exerce l'action des champs. Mais, d'autre part, une certaine quantité de gaz est nécessaire pour la production des rayons positifs, puisque ceux-ci sont eux-mêmes des atomes ou molécules empruntés au gaz contenu dans le tube. Pour résoudre cette difficulté, on sépare, en général, la chambre de production de la chambre d'observation au moyen d'un tube capillaire ; on peut alors, avec une pompe à grand débit maintenir un bon vide, dans la chambre d'observation, tandis que la chambre de production est constamment alimentée par le gaz qui lui est nécessaire.

**2. Méthode des paraboles.** — Cette méthode, inaugurée par J.-J. Thomson, consiste à produire simultanément les déviations  $z$  et  $y$  dans des directions perpendiculaires entre elles, ainsi qu'à la direction primitive du faisceau. Il existe alors entre  $z$  et  $y$  la relation :

$$\frac{z^2}{y} = k \frac{e}{m}, \quad \text{où } k \text{ est une constante.}$$

Si le faisceau est constitué par une seule espèce de particules chargées avec un rapport unique  $e/m$ , mais avec des vitesses différentes, la trace du faisceau sur l'écran d'observation (écran phosphorescent ou plaque photographique) est une parabole ayant comme axe la direction  $y$  et

comme tangente au sommet la direction  $z$ . Tel est précisément le cas des rayons positifs qui prennent naissance dans l'espace sombre devant la cathode, à diverses distances de celle-ci, et qui, par conséquent, acquièrent une énergie cinétique proportionnelle à la différence de potentiel qui existe entre le point de production et la cathode. A chaque valeur du rapport  $e/m$  correspond une parabole différente. Chaque espèce d'atomes ou de molécules chargés peut ainsi être représentée par une certaine parabole. De plus, une même espèce de molécules ou d'atomes peut apparaître avec des charges différentes qui, cependant, sont toujours un multiple de la charge élémentaire; ce sont des atomes ou molécules à *charges multiples*.

J.-J. Thomson et ses élèves ont obtenu de beaux tracés de paraboles correspondant à des rayons positifs parfaitement définis, et non modifiés lors de leur parcours dans la chambre d'observations. Il a été aussitôt manifeste que le phénomène présente une très grande variété et que l'on observe, à l'état de rayons positifs, non seulement des atomes ou molécules connus, à charge simple ou multiple, mais aussi des combinaisons moléculaires inconnues dans d'autres conditions. Se basant sur ces résultats, J.-J. Thomson a affirmé sa conviction que les rayons positifs offrent une nouvelle méthode d'analyse chimique à laquelle un grand avenir est réservé. Il faut reconnaître que cette opinion est parfaitement justifiée et que l'analyse des masses inaugurée par J.-J. Thomson, poursuivie ensuite par Aston, a conduit à des résultats de la plus haute importance, en permettant de généraliser la notion d'isotopie, et de l'étendre à la plupart des éléments.

**3. Mesure des masses atomiques et moléculaires. Les paraboles du néon.** — Les clichés, obtenus par la méthode ci-dessus décrite, présentent, en général, un certain nombre d'arcs de parabole, dont chacun correspond à un rapport  $e/m$  déterminé. Puisque la déviation électrique  $y$  est inversement proportionnelle à l'énergie cinétique des particules, sa valeur ne peut dépasser une certaine limite qui correspond à l'énergie maximum déterminée par la différence de potentiel qui alimente le tube; tous les arcs de parabole s'arrêtent donc à une ligne limite,  $y = \text{constante}$ .

A un rapport  $e/m$  on fait correspondre une masse  $m$ , en attribuant à la charge  $e$  une valeur acceptable, égale soit à la charge élémentaire, soit à un petit multiple de celle-ci. Le choix comporte une certaine part d'arbitraire; il est cependant limité par des conditions résultant de l'expérience. On trouve, par exemple, que les charges multiples sont rares et se présentent sur les atomes plutôt que sur les molécules. Certaines espèces

de particules chargées sont très fréquemment présentes dans le tube, et leurs paraboles, faciles à identifier, servent de lignes de repère. Telle est la parabole de l'atome d'hydrogène à charge simple  $H^+$ , observée sur tous les clichés. Dans bien des cas, une trace de gaz suffit pour produire une ou plusieurs paraboles caractéristiques, de sorte que l'analyse des masses à l'aide des rayons positifs ne demande que très peu de matière.

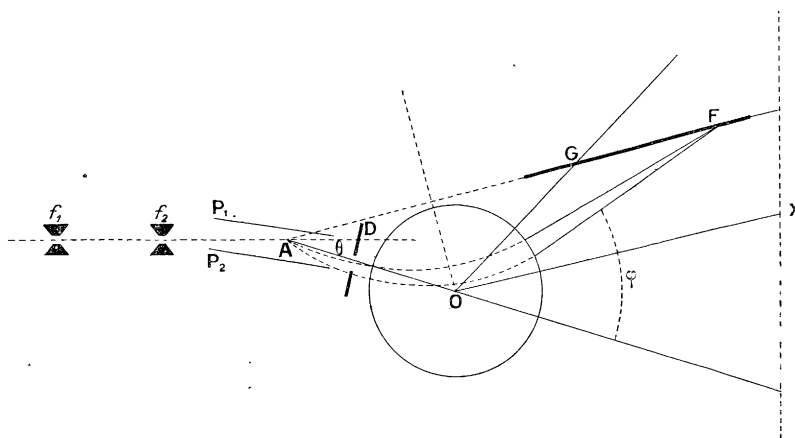
L'atome d'hydrogène apparaît toujours avec une charge simple, ce qui est conforme à la conception suivant laquelle l'atome d'hydrogène neutre ne possède qu'un électron; quand celui-ci est détaché, il reste le noyau d'hydrogène ou *proton* avec une unité de charge positive. Il est donc légitime de considérer le proton comme l'élément indivisible de charge positive, de même que l'électron constitue l'élément de charge négative. La molécule d'hydrogène donne une parabole qui indique une charge simple.

• Pour l'oxygène on observe trois paraboles qui correspondent à  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O^2+$  (atome à charge simple, atome à charge double, molécule à charge simple). Le carbone donne les lignes  $C^+$ ,  $C_2^+$ ,  $CO^+$ ,  $CO^2+$  (atome à charge simple ou double, molécules d'oxyde de carbone et de gaz carbonique à charge simple). De plus, cet élément combiné à l'hydrogène produit les composés  $CH$ ,  $CH^2$ ,  $CH^3$ , qui ont une existence individuelle quand ils portent une charge simple, alors qu'ils n'en ont pas à l'état neutre. De la même manière les composés  $OH^+$ ,  $OH^2+$ ,  $OH^3+$ , existent à l'état de rayons positifs dans les tubes à vide. On y trouve aussi couramment le composé  $H^3+$ , et on y a découvert les hydrures de gaz rares tels que  $NeH^+$  ou  $HeH^+$ . On peut concevoir la formation de tels composés en ayant recours aux conceptions récentes de la structure de l'atome. Par exemple, un atome de néon qui a perdu un électron périphérique ne possède plus que 7 électrons dans son enveloppe extérieure, de sorte que celle-ci est semblable à celle du fluor ou du chlore; on comprend alors que cet ion du néon puisse fixer un atome d'hydrogène, et cela seulement parce qu'il est chargé. La formation d'autres composés en apparence anormaux, s'explique de la même manière. On observe aussi sur les clichés des paraboles qui correspondent à des charges négatives; elles sont relatives à des atomes qui ont perdu leur charge primitive par recombinaison, et qui ont, de plus, acquis un électron en pénétrant dans la chambre d'observation. Cette circonstance ne se produit guère pour les molécules, qui apparaissent presque toujours avec une charge positive simple. Les charges multiples apparaissent d'autant plus fréquemment que le poids atomique est plus élevé. Le mercure peut perdre jusqu'à 8 électrons à la fois.

Le résultat le plus remarquable de l'analyse des masses par la méthode des paraboles, a été l'observation de deux lignes dans le cas du néon. Ces lignes correspondaient aux masses 20 et 22, l'intensité de la ligne 22 étant très inférieure à celle de la ligne 20. J.-J. Thomson entrevit l'explication possible de ce résultat par une structure complexe du néon, dont les deux constituants, de masses moléculaires 20 et 22, formeraient un mélange naturel avec une masse moléculaire moyenne 20.2. Cette hypothèse a été aussitôt soumise au contrôle de l'expérience par Aston qui soumit une certaine quantité de néon à une distillation fractionnée et à une diffusion fractionnée. La première méthode se montra sans effet, mais la deuxième permit d'obtenir des fractions avec un écart de densité petit, mais certain. Mais comme, d'autre part, l'étude des radioéléments avait déjà fait admettre l'existence d'éléments isotopes, Aston entreprit de poursuivre l'étude de l'isotopie par la méthode des rayons positifs, et de perfectionner cette méthode de manière à obtenir une mesure des masses assez précise, permettant de distinguer les constituants d'éléments jusque là réputés simples. L'appareil qu'il imagina à cet effet a été nommé par lui « spectrographe des masses ».

4. Spectrographe des masses. — Le principe de ce dispositif repose sur une certaine *achromatisation* du faisceau de rayons positifs, comparable à celle que l'on réalise pour la lumière au moyen de prismes et de lentilles. De même que, dans ce dernier cas, un faisceau lumineux, dévié et dispersé par un premier prisme, est achromatisé par un deuxième prisme qui compense en partie la déviation produite par le premier, de même un faisceau de rayons positifs, d'abord dévié par un champ électrique qui produit une faible dispersion des rayons d'inégales vitesses, est ensuite dévié en sens inverse par un champ magnétique, de telle manière que les deux rayons extrêmes du faisceau dispersé se trouvent à nouveau ramenés en un même point formant foyer (fig. 1). A chaque valeur du rapport  $e/m$  correspond un foyer. Tous ces foyers sont situés sur une courbe qui est presque une ligne droite, et qui peut être reproduite sur une plaque photographique convenablement placée. On obtient ainsi le *spectre des masses* des matières gazeuses contenues dans le tube à décharge. La précision des mesures de masses est évaluée à 0,001. C'est à l'aide de cet appareil qu'Aston entreprit l'examen de divers corps simples qui sont des gaz ou qui font partie de composés gazeux, et il obtint dans cette voie des résultats extrêmement importants. Il prouva que certains des éléments examinés sont réellement simples (hydrogène, oxygène, car-

bone, soufre, etc...). mais que beaucoup d'autres sont complexes et se composent d'un mélange d'isotopes au nombre de deux ou davantage. Les premiers résultats particulièrement frappants ont été obtenus pour le néon, pour lequel les prévisions de J.-J. Thomson ont été entièrement confirmées; aussitôt après, il a été prouvé que le chlore se compose de deux isotopes dont les masses atomiques sont 35 et 37. Les recherches



$f_1, f_2$ , fentes déterminant un faisceau étroit de rayons positifs.  $P_1, P_2$ , condensateur produisant la déviation électrostatique variable avec la vitesse pour la même masse des particules.  $A$ , foyer d'où semblent provenir les rayons après la déviation électrique.  $D$ , diaphragme limitant le faisceau dispersé.  $O$ , centre des pièces polaires produisant le champ magnétique qui dévie les rayons en sens inverse de la déviation électrostatique.  $F$ , foyer où viennent converger les rayons correspondant à une même valeur de  $e/m$ .  $GF$ , plaque photographique disposée suivant la surface focale, lieu des points tels que  $F$  pour les différentes valeurs de  $e/m$ .

consécutives ont montré que l'isotopie est un phénomène qui se rencontre chez la plupart des éléments chimiques. Avant de donner les résultats de cette belle analyse, nous décrirons encore un autre procédé qui permet de la compléter en l'appliquant à des éléments qui ne forment pas d'ordinaire de composés gazeux.

**5. Rayons anodiques.** — On sait qu'une cathode incandescente est une source d'électrons qui peuvent former des rayons cathodiques. On peut de même chercher à faire produire par une anode incandescente des rayons positifs partant de la surface de l'anode ou *rayons anodiques*. Pour cela, la matière considérée, fixée à l'anode, doit être portée à une température élevée, ce que l'on peut obtenir à l'aide d'une spirale chauffante, parcourue par un courant électrique. L'expérience a montré que ce chauffage n'est pas toujours suffisant pour volatiliser à l'état d'ions positifs les métaux alcalins ou alcalinoterreux, utilisés soit à l'état métallique, soit dans leurs

oxydes ou leurs sels. C'est pourquoi certains expérimentateurs ont soumis de plus ces matières à un bombardement par les rayons cathodiques. On obtient ainsi, assez difficilement il est vrai, un flux de particules chargées positivement pour des corps tels que le sodium, le potassium, le magnésium, le zinc, etc...

Ces rayons positifs partant de l'anode même, ont tous la même vitesse quand ils sont accélérés par le même champ produit par une différence de potentiel  $V$  établie entre l'anode et la cathode. Leur énergie cinétique est donnée par la relation :

$$\frac{mv^2}{2} = eV.$$

Pour connaître le rapport  $e/m$  il suffit de produire leur déviation magnétique. Dans un champ uniforme  $H$ , les rayons décrivent une trajectoire circulaire de rayon  $R$  tel que

$$\frac{mv}{e} = RH.$$

Une méthode d'expérience basée sur ce principe a été développée par Dempster. Un fin pinceau de rayons anodiques, accéléré par une différence de potentiel connue, pénètre dans une région de champ magnétique uniforme dans laquelle il décrit un demi-cercle ; à la sortie du champ le faisceau traverse une fente étroite au delà de laquelle il est reçu sur une électrode isolée à laquelle il communique sa charge. Pour que le faisceau suive la trajectoire imposée, il faut que la différence de potentiel  $V$  ait une valeur déterminée. En faisant varier  $V$  on fait varier le courant reçu par l'électrode. Quand  $V$  passe par la valeur critique, la charge de l'électrode passe par un maximum étroitement défini. L'observation de ce maximum permet de calculer  $e/m$  et donne, de plus, une mesure du nombre des particules du faisceau. Si celui-ci est composé de plusieurs espèces isotopiques de masses différentes, à chacune d'elle correspondra un maximum différent, et l'importance relative de ces maxima doit permettre d'évaluer les proportions des isotopes avec plus de précision qu'on ne peut le faire en comparant les impressions photographiques du spectre des masses.

**6. Résultats d'observation.** — La liste des corps jusqu'ici analysés est donnée dans le tableau IV où l'on a indiqué le nombre des isotopes trouvés, ainsi que leurs masses. La planche I représente quelques photographies de spectres de masses (1).

(1) Reproduction autorisée par les éditeurs du *Philosophical Magazine*.



Voici les observations générales qu'on peut faire à ce sujet :

1° Un certain nombre d'éléments chimiques se montrent simples ; tels sont en premier lieu l'hydrogène, puis l'hélium, le carbone, l'azote, l'oxygène, le fluor, le sodium, le phosphore, le soufre, etc. Il est à remarquer que, parmi ces éléments simples, il en est plusieurs dont le poids atomique chimique rapporté à l'oxygène est un multiple assez exact de 4, et pour lesquels, par conséquent, le nombre atomique  $N$  est égal à la moitié du poids atomique  $P$ .

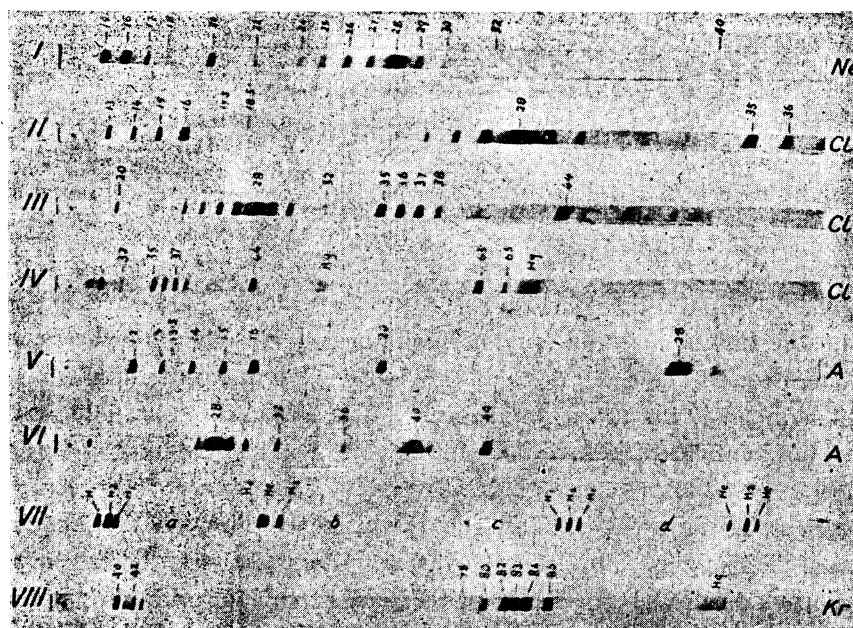


PLANCHE I

2° De nombreux éléments, chimiquement simples, sont des mélanges d'isotopes ; tels sont les deux lithiums,  $\text{Li}_6$  et  $\text{Li}_7$ , ou les deux chlores  $\text{Cl}_{35}$  et  $\text{Cl}_{37}$ . Les éléments de poids atomiques élevés semblent susceptibles d'avoir un nombre plus grand d'isotopes (krypton : 6 isotopes ; xénon : 9 isotopes ; étain : 8 isotopes ; mercure ; 6 isotopes).

3° On constate, dans tous les cas, que *les masses déterminées à l'aide de rayons positifs et rapportées à celle de l'oxygène sont, à une grande approximation, des nombres entiers*. Ainsi les écarts de poids atomiques chimiques à partir de nombres entiers doivent s'expliquer par la proportion des isotopes dans le mélange. Dans la plupart des cas, l'analyse des masses permet, en effet, de prévoir des proportions d'isotopes qui conviennent bien

TABLEAU IV.  
Isotopes.

TYPES CHIMIQUES		N P. A. CHIM. N			MASSES			
1	Hydrogène..	H	1	1,008	1	1,008		
	Hélium.....	He	2	4,00	1	4		
2	Lithium....	Li	3	6,94	2	6 7		
	Glucinium..	Gl	4	9,1	1	9		
	Bore.....	B	5	10,9	2	10 11		
	Carbone....	C	6	12,00	1	12		
	Azote.....	Az	7	14,008	1	14		
	Oxygène...	O	8	16,00	1	16		
	Fluor.....	F	9	19,00	1	19		
	Néon.....	Ne	10	20,20	2	20 22		
3	Sodium....	Na	11	23,00	1	23		
	Magnésium..	Mg	12	24,32	3	24 25 26		
	Aluminium..	Al	13	26,96	1	27		
	Silicium....	Si	14	28,3	2	28 29 30		
	Phosphore..	P	15	31,04	1	31		
	Soufre.....	S	16	32,06	1	32		
	Chlore.....	Cl	17	35,46	2	35 37 39		
	Argon.....	A	18	39,9	2	36 40		
4	Potassium..	K	19	39,10	2	39 41		
	Calcium....	Ca	20	40,07	2	40 44		
	Fer.....	Fe	26	55,84	1			
	Nickel.....	Ni	28	58,68	2	58 60		
	Cuivre.....	Cu	29	63,57	2	63 65		
	Zinc.....	Zn	30	65,37	4	64 66 68 70		
	Arsenic....	As	33	74,96	1	75		
	Sélénium...	Se	34	79,2	6	74 76 77 78 80 82		
	Brome.....	Br	35	79,92	2	79 81		
	Krypton....	Kr	36	82,92	6	78 80 82 83 84 86		
5	Rubidium..	Rb	37	85,45	2	85 87		
	Étain.....	Sn	50	118,7	8	116 117 118 119 120 121 122 124		
	Antimoine..	Sb	51	120,2	2	121 123		
	Iode.....	I	53	126,92	1	127		
	Xénon.....	X	54	130,2	9	124 126 128 129 130 131 132 134 136		
6	Césium....	Cs	55	132,81	1	133		
	Mercure....	Hg	80	200,6	6	197-200 202 204		
	Thallium...	Tl	81	204,0	4			
	Plomb.....	Pb	82	207,2	14			
	Bismuth....	Bi	83	209,0	5			
	Polonium..	Po	84		7			
	Emanations.		86		3			
7	Radium....	Ra	88	226,0	4			
	Actinium...	Ac	89		2			
	Thorium...	Th	90	232,15	6			
	Uranium X <sub>2</sub> .	UX <sub>2</sub>	91		2			
	Uranium...	Ur	92	238,2	2			

à la valeur du poids atomique chimique. Dans certains cas, cependant (lithium, zinc, etc...), les proportions d'isotopes obtenues sous forme de rayons anodiques semblent très variables, sans que la cause de cette variation ait été élucidée.

4° Les interventions bien connues dans la classification des éléments (argon-potassium, nickel-cobalt, iode-tellure) sont entièrement expliquées par la composition isotopique et les proportions des isotopes.

**7. Constance des poids atomiques chimiques.** — Puisque les éléments chimiques réputés simples sont des mélanges d'isotopes, il est naturel de se demander si le poids atomique chimique possède un sens précis, indépendant des procédés de sa détermination et du lieu d'origine de la matière considérée.

Pour ce qui concerne les méthodes de purification et d'analyse chimique, on peut admettre que celles-ci n'affectent pas d'une manière sensible le poids atomique mesuré. Ainsi que nous allons le voir, il n'est guère possible d'obtenir par la voie chimique une séparation appréciable d'éléments isotopes, et c'est seulement dans des cas très particuliers (distillation du mercure dans le vide), que des écarts, d'ailleurs très petits, peuvent résulter de la méthode expérimentale employée.

Les prévisions sont moins fermes en ce qui concerne l'influence possible du lieu d'origine des éléments. Plusieurs savants ont institué des expériences à ce sujet, et ont examiné le poids atomique d'un certain nombre de corps de provenances diverses (argent, cuivre, plomb, mercure, chlore, sodium, etc...). Sauf dans un ou deux cas, on n'a constaté aucune influence de la provenance sur le poids atomique, et ceci porte à croire que toutes les matières examinées ont été ou bien très parfaitement mélangées avant la solidification de la croûte terrestre, ou bien, ce qui est plus probable, produites à une époque très reculée en proportions isotopiques constantes.

**8. Relations statistiques entre les isotopes. Modes d'isotopie.** — Il semble, dès à présent, que le nombre d'isotopes et leur poids atomique ne sont pas arbitraires. Ainsi qu'on le sait, les écarts des poids atomiques chimiques à partir de nombres entiers sont beaucoup moins importants que ne l'indiquerait une simple loi de probabilité. Nous avons été conduits à remplacer la notion d'un élément chimique par celle d'un *groupe chimique*; mais il arrive fréquemment que le groupe n'a qu'un seul représentant. Il semble, de plus, que le nombre d'isotopes ne peut dépasser

certaines limites (jusqu'à présent 9 au plus) et que l'écart des masses des isotopes est également soumis à une limite (jusqu'à présent 12 unités au plus). Remarquons aussi que les interversions dans la classification périodique sont en petit nombre, et il en résulte clairement, que le nombre et la proportion des isotopes sont soumis à des lois générales, de nature peut-être statistique, qui assurent la progression régulière du poids atomique chimique avec le nombre atomique.

On doit à Harkins des remarques intéressantes sur la richesse relative de la croûte terrestre en certains éléments. Ceux pour lesquels  $N$  et  $P$  sont pairs semblent particulièrement abondants, aussi bien à la surface de la terre que dans les météorites (oxygène, magnésium, silicium, calcium, fer, etc...); on peut estimer qu'il constituent environ 90 % de la matière totale, en pourcentage atomique.

Certaines valeurs de masse ne semblent convenir à aucun élément; tels sont les nombres 2, 3, 5, 8, 13 etc... On n'aperçoit actuellement aucune relation entre ces nombres.

Deux éléments peuvent avoir la même masse sans appartenir au même type chimique; on les nomme *isobares*. Parmi les radioéléments, il en est de fréquents exemples. car deux éléments radioactifs sont isobares quand l'un résulte de l'autre par émission d'un rayon  $\beta$  (par ex. Ra E et polonium). Parmi les éléments stables, l'argon et le calcium offrent un exemple d'isobares par leurs isotopes de masse 40.

Les transformations de radioéléments conduisent à envisager que l'isotopie peut appartenir à des modes différents, et que, dans l'isotopie même, il peut en quelque sorte y avoir des degrés, bien que sa condition fondamentale soit toujours l'égalité du nombre atomique. Ainsi il y a une parenté plus étroite entre les corps B qui jouent le même rôle dans leurs familles respectives, qu'entre l'un deux et le radium D, ou le plomb.

**9. Spectres des isotopes.** — L'hypothèse primitive de Russell et de Soddy attribuait aux isotopes des spectres identiques. Nous avons vu qu'il est, en effet, difficile de constater une différence dans les spectres d'émission mais que, cependant, Merton a réussi à mettre en évidence un très léger écart entre les fréquences de certaines raies pour les différentes espèces de plomb. Quelques observations encore incomplètement établies ont aussi été publiées sur les spectres du lithium et du mercure.

L'observation des bandes d'absorption semble avoir donné des différences plus importantes. Ces bandes sont attribuées, comme on sait, à un effet de rotation des molécules, qui accompagne un effet d'oscillation. Leur

observation permet de calculer le moment d'inertie des molécules. L'expérience a montré que les bandes infra-rouges du gaz chlorhydrique se résolvent, non point en lignes simples, mais en doublets; les deux lignes d'un doublet sont dues à deux fréquences d'oscillation fondamentale des deux chlores 35 et 37; l'écart du doublet est numériquement conforme aux considérations théoriques.

Il ne semble pas douteux que la similitude des spectres des isotopes ne soit extrêmement étendue. Les fréquences d'émission sont liées bien plus étroitement à la charge du noyau qu'à sa masse. En ce qui concerne les hautes fréquences (rayons X) aucune différence n'a jusqu'ici été observée.

### C. STRUCTURE DES ATOMES

**1. Unité de la matière, éléments de structure.** — Les transformations radioactives ont établi la conviction que, parmi les constituants des atomes, se trouvent d'une part l'hélium, d'autre part les électrons, et que l'on doit trouver ces constituants dans le noyau, puisque toute transformation radioactive porte essentiellement sur celui-ci. Il apparaissait dès lors très probable que les atomes d'hydrogène doivent aussi intervenir de quelque manière dans la structure nucléaire, et que l'on se trouve ainsi ramené à la conception de l'unité de la matière, envisagée par Prout dès l'origine de la chimie. Les recherches d'Aston sont venues apporter à ce point de vue un appui considérable, en démontrant que les masses atomiques d'éléments réellement simples sont des nombres entiers.

Un écart important subsiste entre l'hydrogène et l'oxygène, ou, ce qui revient au même, entre l'hydrogène et l'hélium. Pour  $O = 16$ ,  $He = 4$ , on a  $H = 1,0077$ . On explique aujourd'hui ce déficit de masse de l'hélium par rapport à l'hydrogène dont il est supposé formé, en invoquant la perte de masse subie par les quatre atomes d'hydrogène lors de leur condensation en un atome d'hélium, avec un dégagement considérable d'énergie interne (Langevin, Einstein). Des pertes de masse analogues mais moins importantes ont pu avoir lieu dans d'autres cas, de sorte qu'il n'est pas à espérer que les poids atomiques rapportés à l'oxygène soient des nombres entiers à tout degré d'approximation. De petites différences semblent d'ailleurs déjà avoir été observées par Aston. On peut aussi citer le cas de l'azote dont le poids atomique est légèrement supérieur à 14, et dont le noyau doit comprendre des atomes ou noyaux d'hydrogène, conformément aux expériences de Rutherford, qui a réussi à détacher de cet élément un petit nombre de ces noyaux (rayons H), à l'aide d'un bombardement intense par des rayons  $\alpha$ . L'excès du poids atomique pourrait s'expliquer

en admettant que le noyau d'azote comporte trois noyaux d'hélium, deux noyaux d'hydrogène et un électron, les noyaux d'hydrogène ayant une liaison relativement faible avec la partie centrale.

De toute manière, nous pouvons considérer comme éléments de structure le *proton* (noyau d'hydrogène), l'*électron* et le *noyau d'hélium*. On pourrait convenir de nommer ce dernier *hélium* et appeler *nucléon*, pour abrégé, l'électron qui fait partie du noyau. En plus de ces éléments, on peut envisager leurs groupements, tels que l'atome d'hydrogène, l'atome d'hélium ou l'ion d'hélium. Il conviendrait de désigner les éléments de structure principaux par des symboles (par exemple,  $e$  pour l'électron,  $\beta$  pour le nucléon,  $\alpha$  pour l'hélium,  $\pi$  pour le proton).

Pour le proton et l'électron on connaît les masses et les dimensions, pour l'atome d'hélium la masse seulement; la mesure du rapport  $e/m$  et l'application de la théorie de la masse électro-magnétique, conduit, dans l'hypothèse d'une sphère de rayon  $r$  à charge superficielle, aux résultats suivants :

Electron.	Proton.
$m = 9,0 \times 10^{-28} \text{ g}$	$m = 1,6 \times 10^{-24} \text{ g}$
$r = 1,9 \times 10^{-13} \text{ cm}$	$r = 1,03 \cdot 10^{-16} \text{ cm}$

La masse de l'atome d'hélium est connue par son poids atomique  $\text{He} = 4, 0$ , mais ses dimensions dépendent de la structure dont on ne connaît pas de modèle probable. On a essayé de constituer un modèle de noyau d'hélium au moyen de deux électrons et de quatre protons en rotation autour d'un axe formé par les électrons, mais ce modèle se heurte à des difficultés considérables qui prouvent que, même dans les cas les plus simples, nous ne pouvons encore prétendre à construire des noyaux.

**2. Assemblage.** — Les noyaux sont des assemblages des éléments de structure ci-dessus indiqués, la constitution de chaque assemblage étant réalisée avec des pertes d'énergie et de masse peu importantes par rapport à celles qui sont mises en jeu dans la condensation de l'hydrogène en hélium.

Des schémas de ce genre ont été développés en assez grand nombre de divers côtés, mais aucun d'eux ne s'impose jusqu'à présent par une base d'argumentation solide. Certains auteurs font intervenir comme élément de structure un isotope présumé de l'hélium, de masse atomique 3; rien n'oblige jusqu'ici à admettre l'existence de ce noyau qui avait été prévu pendant quelque temps à la suite de certaines expériences de Rutherford dont les résultats n'ont pas été maintenus.

Parmi les électrons il en est qui sont contenus dans le noyau, *élec-*

*trons nucléaires nucléons*, symbole  $\beta$ ). D'autres forment l'enveloppe électronique extérieure (symbole  $e$ ). Ce sont ces derniers qui seuls déterminent les propriétés physiques et chimiques de l'atome à l'exception de la propriété radioactive. On considère qu'ils sont distribués en couches successives, désignées par les lettres K, L, M, N, O et P, et qu'ils occupent des *niveaux d'énergie* distincts, selon le travail nécessaire pour les extraire de l'atome. Ces électrons sont en nombre égal au nombre atomique  $N$ ; quand  $N$  est élevé, seuls les électrons superficiels déterminent la valence, les propriétés chimiques et l'émission de lumière, tandis que les électrons plus profonds interviennent pour la production des rayons X caractéristiques de l'atome. Il semble que les propriétés magnétiques dépendent de la symétrie de la distribution électronique.

Le nombre de nucléons résulte des valeurs du poids atomique et du nombre atomique. Le noyau d'un corps simple de poids atomique  $P$  est composé de  $P$  protons, et comme la charge du noyau est de  $N$  unités positives, il doit y avoir dans le noyau  $n = P - N$  nucléons.

Pour certains atomes très abondants dans la nature, le rapport  $n/P$  est égal à 0,5 (carbone, oxygène, etc.). Ce rapport augmente pour les valeurs élevées de  $P$ , tout en restant inférieur à 0,6. Puisqu'il y a une limite pour la valeur de  $P$  (uranium 238,2), on doit en conclure que la constitution de noyaux plus massifs se heurte à des difficultés fondamentales qui ne permettent pas leur stabilité.

L'instabilité des radioéléments est liée sans aucun doute à un poids atomique élevé, puisque les radioéléments occupent les dernières places de la classification, mais on ne connaît pas de relation simple entre la masse et la vie moyenne d'un radioélément. L. Meitner suppose que dans leur noyau des atomes d'hélium complets ( $\alpha + 2\beta$ ) peuvent jouer un certain rôle, car l'émission d'une particule  $\alpha$  est souvent suivie de l'émission de 2 particules  $\beta$ . On peut de même penser que certains noyaux stables préexistent avec une certaine indépendance dans les noyaux radioactifs; par exemple, le plomb d'urane 206, pourrait être un élément de structure de l'uranium et de tous ses dérivés.

Puisque les notions sur les éléments de structure dérivent exclusivement de notre connaissance des transformations radioactives, certains auteurs ont jugé opportun d'étendre celles-ci, en supposant qu'elles se prolongent dans le domaine des éléments inactifs; il y aurait ainsi deux séries, dérivées l'une de l'uranium, l'autre du thorium, pénétrant toute la classification. Cette conception hypothétique est basée sur les modes possibles de la destruction des atomes lourds, mais laisse de côté leur for-

mation, laquelle cependant a dû se produire dans la nature, puisque les nébuleuses ne semblent contenir que de l'hydrogène et de l'hélium.

#### D. LA SÉPARATION DES ISOTOPES.

**1. Classement des méthodes, poids atomiques et densités.** — Les méthodes qui ont en vue la séparation des isotopes reposent toutes sur la différence de masse des constituants d'un mélange isotopique. Il convient par conséquent, de distinguer tout d'abord, entre les phénomènes physiques et chimiques qui dépendent de la masse et ceux qui sont déterminés par la charge du noyau, c'est-à-dire par le nombre atomique. Il convient, de plus, de classer séparément les phénomènes qui dépendent d'équilibres de régime, ou intervient la masse (effet de gravitation ou de force centrifuge), et ceux où la masse intervient uniquement pour influencer la vitesse d'agitation moléculaire (diffusion et effusion, distillation irréversible). Enfin on doit mettre à part les séparations d'isotopes résultant de processus radioactifs.

On utilise couramment la notion de *coefficient d'enrichissement* pour un mélange de deux isotopes. Ce coefficient est déterminé d'après Rayleigh ainsi qu'il suit :  $X$  et  $Y$  étant les proportions dans le mélange d'origine,  $x$  et  $y$  étant les proportions dans le mélange modifié, les coefficients d'enrichissement relatifs aux deux corps sont :

$$s = \frac{x}{y} \frac{Y}{X} \qquad r = \frac{y}{x} \frac{X}{Y}.$$

Un changement de proportion détermine un changement de masse atomique ou moléculaire moyenne  $M$  et un changement de la densité  $D$ , qui s'expriment par les formules :

$$\Delta M = (m' - m) (r - 1) \frac{XY}{X + rY} \qquad \frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta M}{M},$$

$m$  et  $m'$  désignent les masses moléculaires relatives aux proportions  $X$  et  $Y$ .

Par analogie avec les observations faites sur les plombs, on admet que le volume atomique des isotopes à l'état solide ou liquide est le même.

**2. Séparation des isotopes radioactifs.** — Dans un mélange isotopique radioactif, la séparation se produit automatiquement par extinction des isotopes à vie courte et conservation de l'isotope dont la vie moyenne est la plus longue. Ainsi, dans le mélange industriel de radium et de mésothorium provenant de la monazite, la proportion de radium au mésothorium augmente au cours des années, jusqu'à destruction pratiquement complète du mésothorium.

Certains radioéléments, d'ordinaire mélangés à leurs isotopes, peuvent cependant être obtenus séparés de ceux-ci quand leur substance mère n'en



contient pas. Ainsi, on peut préparer du mésothorium exempt de radium à partir de thorium purifié, tandis que le mésothorium industriel est mélangé au radium parce que la monazite dont il est extrait contient à la fois de l'uranium et du thorium. De même le radium D provenant de minéraux est toujours mélangé au plomb, mais on peut en préparer sans plomb, si l'on recueille avec des précautions spéciales le dépôt actif de l'émanation du radium.

### 3. Équilibre de régime.

a) *Gravitation*. — On peut envisager le cas d'un gaz qui se distribue dans l'atmosphère sous l'action de la gravitation et de l'agitation thermique. La formule bien connue de nivellement barométrique montre que le gradient de concentration est un peu différent pour les gaz isotopes, de sorte qu'en puisant le gaz à une altitude élevée on doit trouver une composition isotopique un peu différente de celle qui existe à la surface de la terre. Ce raisonnement est applicable aux deux néons, et permet de prévoir, à 30 km d'altitude, un poids atomique moyen de 20,15 au lieu de 20,20.

b) *Force centrifuge*. — L'effet de force centrifuge, en principe analogue à celui de la pesanteur, peut se manifester avec plus d'intensité, par l'emploi de grandes vitesses de rotation. Par contre, les calculs complets relatifs à ce procédé sont moins simples. Il convient d'examiner séparément le cas des gaz et des liquides.

Sous l'influence de la force centrifuge les molécules de gaz sont refoulées vers l'extrémité périphérique du tube de la centrifugeuse, de sorte que la densité du gaz augmente de ce côté en même temps qu'elle diminue du côté de l'axe, le tube étant supposé fermé. En même temps, il y a séparation partielle du mélange isotopique, car l'effet de la force centrifuge, limité par l'agitation moléculaire, s'exerce avec plus d'importance sur les molécules plus lourdes  $m'$  que sur celles  $m$  qui sont plus légères. Il y a donc enrichissement en molécules  $m'$  à la périphérie et en molécules  $m$  du côté de l'axe. On trouve

$$r = e^{\frac{(m' - m) V^2}{2 RT}},$$

où  $r$  est le coefficient d'enrichissement des molécules  $m'$  entre l'origine du tube et son extrémité périphérique,  $V$  est la vitesse périphérique;  $R$ , la constante des gaz parfaits;  $T$ , la température absolue. Pour connaître les concentrations aux deux extrémités j'ai indiqué une méthode de calcul graphique, qui donne la solution complète du problème; pour prévoir le changement du poids atomique, en principe très restreint, même quand on

donne à  $V$  la plus grande valeur qui puisse être pratiquement obtenue (entre  $10^4$  et  $10^5$  cm. par seconde), on peut employer des formules d'approximation. La théorie de la diffusion permet de prévoir que l'équilibre de régime peut s'établir en un temps assez court, mais les opérations de prélèvement de gaz ne semblent pas faciles, et jusqu'ici aucune expérience sur ces derniers n'a été faite par cette méthode. La théorie permet de prévoir un écart de poids atomique de 0,07 pour le néon et 0,14 pour le gaz chlorhydrique, en donnant à  $V$  la valeur  $10^5$  cm : s à la température ordinaire.

Dans le cas des liquides, la densité reste à peu près constante en tous les points du tube; les molécules  $m'$  ne peuvent se concentrer à la périphérie qu'en glissant entre les molécules  $m$  et en se substituant à celles-ci. C'est pourquoi le calcul des concentrations axiale et périphérique n'est pas le même que dans le cas des gaz. Toutefois la formule écrite ci-dessus pour les gaz s'applique aussi aux liquides, ainsi qu'on peut s'en assurer en déterminant la distribution des molécules  $m$  et  $m'$  par les lois de la probabilité. On rencontre cependant dans le cas des liquides une difficulté résultant de la lenteur de l'établissement du régime; la théorie montre que celui-ci peut demander plusieurs jours pour être à peu près réalisé. Il semble aussi que la vibration des centrifugeuses et les variations de température contribuent activement à rétablir le mélange, même quand celui-ci n'était pas homogène au début. Les expériences faites sur le mercure et sur le plomb fondu n'ont conduit jusqu'ici à aucune séparation. (Joly et Poole; Mulliken).

c) *Diffusion thermique.* — Quand un mélange gazeux est contenu dans un tube dont les deux extrémités sont maintenues à des températures différentes, les molécules plus lourdes se concentrent dans la région froide et les molécules plus légères dans la région chaude (Chapman). Ce phénomène, qui permet une séparation partielle d'un mélange d'hydrogène et de gaz carbonique, a été proposé pour la séparation des isotopes, mais aucune expérience n'a encore été publiée à ce sujet. Au point de vue théorique l'efficacité de la méthode ne paraît pas considérable.

d) *Distillation fractionnée et équilibres chimiques.* — On pourrait espérer une séparation d'isotopes par distillation fractionnée s'il existait une différence appréciable entre les pressions de vapeurs saturantes. Dans cet ordre d'idées, Aston a effectué une distillation fractionnée très laborieuse de néon naturel, sans qu'aucune séparation ait été obtenue. L'examen théorique de la question a été fait par Lindemann, en se basant sur la

relation qui existe entre la pression de vapeur saturante, les chaleurs spécifiques à l'état gazeux et à l'état condensé et les constantes chimiques de Nernst. La chaleur spécifique à l'état condensé intervient par les fréquences propres d'oscillation qui changent avec la masse, si les forces de cohésion chez les isotopes sont supposées les mêmes. Suivant les hypothèses que l'on fait sur les constantes chimiques et sur la valeur de l'énergie au zéro absolu, on trouve des résultats différents; certains laissent prévoir de petites différences, tandis que d'autres conduisent à l'égalité des pressions de vapeur saturante et du potentiel électrochimique à un degré de précision très élevé.

L'expérience semble bien s'être prononcée en faveur de cette dernière solution, puisque les travaux d'Aston sur le néon n'ont donné aucun résultat et puisque, d'autre part, les très nombreux essais de séparation par voie chimique sont restés jusqu'ici complètement inefficaces. On peut citer dans cet ordre d'idées une série de mille cristallisations effectuées sur les plombs isotopes (Richards), ainsi que les nombreux travaux effectués sur les radioéléments.

**4. Méthodes basées sur l'agitation moléculaire.** — On sait que l'énergie moyenne d'agitation moléculaire est la même pour toutes les molécules à la même température, de sorte que la vitesse moyenne est en raison inverse de la racine carrée du poids moléculaire; elle est donc plus grande pour les molécules plus légères. Il existe, par suite, une différence de vitesses moyennes entre des molécules isotopiques de masses différentes. On peut baser sur ce principe plusieurs méthodes de séparation, mais la condition essentielle à réaliser est que l'opération exécutée soit *irréversible*; autrement dit, il ne faut pas que le phénomène utilisé soit compensé par un phénomène inverse découlant de la même cause. Par exemple, s'il s'agit de la distillation, l'évaporation plus rapide des molécules plus légères ne doit pas être compensée par leur retour plus fréquent au liquide. Dans ce groupe viennent se placer les méthodes *de diffusion, d'effusion, de distillation sous basse pression, de vitesse de réaction chimique*. Elles ne peuvent, en principe, fournir qu'une séparation partielle et cela d'autant plus que les vitesses sont toujours peu différentes.

a) *Diffusion des liquides.* — Cette méthode a été utilisée pour tenter la séparation de l'uranium I et de l'uranium II, les deux isotopes présumés de l'uranium. En laissant diffuser une solution d'azotate d'uranyle en présence d'un excès d'anions, on espérait avantager la progression de l'ion qui contient  $Ur_{II}$  (Lachs, Nadratowska et Wertenstein, Hevesy et Putnoký).

A l'extrémité de la colonne dans laquelle se produisait la diffusion, on faisait des prises de liquide sur lesquelles on pouvait déterminer le poids atomique aussi bien que la radioactivité de l'uranium diffusé. Cette expérience a donné un résultat négatif, permettant de conclure à l'égalité des coefficients de diffusion, à la précision de 0,5 pour 100.

Lindemann a développé quelques considérations théoriques sur la séparation des ions isotopes par des différences de mobilités électrolytiques. L'échec de la tentative décrite ci-dessus fait penser qu'on n'aurait guère plus de succès avec la mobilité; il existe, en effet, une relation bien connue entre les coefficients de mobilité et les coefficients de diffusion des électrolytes, et, quand il y a excès considérable d'anions, cette relation se réduit à une simple proportionnalité.

b) *Diffusion des gaz*. — La théorie de la séparation des gaz par diffusion au travers d'une paroi poreuse se résume dans la formule suivante : donnée par Rayleigh

$$\frac{u}{U} = \frac{X}{U} r^{\frac{k_2}{k_2 - k_1}} + \frac{Y}{U} r^{\frac{k_1}{k_2 - k_1}},$$

où  $r$  est le coefficient d'enrichissement précédemment défini;  $k_1$  et  $k_2$  sont les vitesses de diffusion des deux isotopes;  $X$  et  $Y$ , leurs volumes initiaux dont la somme est  $U$ , et  $u$  le volume résiduel après écoulement d'une certaine quantité de gaz. Quand il s'agit de molécules de masses voisines  $m_1$  et  $m_2$ , la formule peut s'écrire approximativement :

$$r = \frac{m_2 + m_1}{m_2 - m_1} \sqrt{\frac{U}{u}},$$

le rapport sous le radical est la *réduction en volume* (« cut » dans les publications anglaises). L'application numérique montre aussitôt que le coefficient d'enrichissement ne peut prendre une valeur notable qu'à condition d'augmenter beaucoup la réduction en volume; en effet l'exposant du radical est 21 dans le cas du néon et 37 dans le cas du gaz chlorhydrique. On aperçoit donc, immédiatement, que l'opération ne peut être qu'extrêmement laborieuse.

Ces prévisions théoriques supposent que les deux gaz diffusent d'une manière indépendante et que leur mélange est parfait. La première de ces conditions est réalisée seulement dans le cas où le chemin moyen des molécules est grand par rapport au diamètre des pores de la paroi (Knudsen). Ceci n'a pas lieu, en général, aux pressions voisines de la pression atmosphérique, et il en résulte une altération du rendement de la séparation. Harkins et Mulliken ont cependant fait observer que, dans le cas particulier

des gaz isotopes, le rendement n'est pas nécessairement inférieur à celui qu'on obtiendrait sous basse pression, et que la vitesse de diffusion de l'isotope plus léger pourrait même être favorisée du fait que son chemin moyen serait plus grand. Il est probable que le déficit de rendement que l'on observe aux pressions élevées est attribuable surtout à l'imperfection du mélange.

La méthode de diffusion des mélanges a été tout d'abord utilisée par Aston pour la séparation du néon. Le néon naturel à basse pression était admis à diffuser au travers de tubes poreux. Comme la quantité de gaz était limitée, il a fallu employer un procédé de fractionnement. Après un grand nombre d'opérations les fractions extrêmes, soigneusement purifiées, ont été soumises à une mesure de densité, dont on déduit pour les poids atomiques 20, 15 et 20, 28. Ainsi une petite séparation a été effectivement obtenue dès 1913, au prix, il est vrai, d'un très grand effort. Un autre dispositif utilisé en 1914 a donné un résultat négatif, attribué par l'auteur à ce fait que l'appareil, quoique beaucoup plus perfectionné dans ses détails, était mis en œuvre sous la pression atmosphérique.

Harkins et ses collaborateurs ont effectué pendant plusieurs années des expériences de diffusion sur le gaz chlorhydrique. Celui-ci pouvant être obtenu à volonté, le problème consiste surtout à en diffuser une grande quantité, de manière à disposer d'une grande réduction de volume. Le calcul montre que pour obtenir une différence de 0,2 sur le poids atomique en une opération avec un résidu de 1 g, il faut diffuser 130 tonnes de gaz chlorhydrique ou 36 tonnes de néon. En conformité avec la difficulté de la tâche, ces expérimentateurs ont établi un appareil pouvant diffuser 1000 litres de gaz par jour sous la pression atmosphérique.

Dans cet appareil, le gaz chlorhydrique, dégagé de sa solution aqueuse, par l'action de l'acide sulfurique et soigneusement lavé, pénètre dans une série de cinq tubes poreux; le gaz qui diffuse à l'extérieur de ces tubes est entraîné par un courant d'air. Aussi bien le gaz diffusé que le gaz non diffusé sont finalement absorbés dans des bains d'eau; on les utilise alors pour préparer du chlorure de sodium que l'on purifie soigneusement. On détermine le poids atomique du chlore soit directement, soit par la mesure précise de la densité d'une solution saturée de chlorure de sodium. Le meilleur résultat jusqu'ici obtenu consistait en 5 grammes de chlore dont le poids atomique 35, 51 est de 0,05 unité supérieur à la valeur normale. La réduction de volume qui a conduit à ce résultat est évaluée à 8000, et le rendement de l'opération à 60 pour 100.

Signalons encore quelques autres travaux relatifs à la diffusion. Stern et Vollmer ont utilisé ce procédé pour tenter de découvrir un isotope de

l'hydrogène de masse 2, ou un isotope de l'oxygène, mais ces recherches ont donné un résultat négatif, en accord avec celui de l'analyse des masses. Kohlweiler pense avoir démontré l'existence d'isotopes de l'iode, en faisant diffuser la vapeur d'iode à travers un grand nombre de plaques poreuses, alors que l'analyse des masses n'indique qu'un seul constituant 127.

Herz a développé une méthode de diffusion *contre un courant gazeux* qui s'est montrée très efficace pour séparer l'hélium et le néon et qu'il espère adapter à la séparation des isotopes. Enfin plusieurs auteurs ont fait ressortir l'intérêt de la *diffusion instantanée* c'est-à-dire d'une avance de molécules légères, constituant en quelque sorte un front de diffusion, jouissant d'un coefficient d'enrichissement particulièrement élevé; le nombre de ces molécules serait par contre nécessairement très réduit.

c) *Effusion*. — Cette méthode consiste à faire écouler un mélange de gaz contenu dans un récipient, au travers d'une ouverture en paroi mince, vers un réservoir où l'on maintient une très basse pression. On peut appliquer à l'effusion la théorie de Rayleigh à condition qu'il y ait, comme l'exige celle-ci, indépendance du passage des gaz et mélange parfait. Il est nécessaire pour cela que le chemin moyen des molécules soit grand par rapport au diamètre de l'orifice (Knudsen). Bronsted et Hevesy ont appliqué cette méthode à la vapeur de mercure. Celle-ci, produite par une surface de mercure chauffée, s'engage dans un tube qui la conduit dans un réservoir où elle est condensée (fig. 2); le tube contient une fenêtre fermée par une feuille de platine percée de 1000 trous de 0,15 mm de diamètre, et c'est au travers de cette passoire que certaines molécules s'échappent dans un tube latéral, au fond duquel elles se condensent. La densité du mercure ainsi recueilli, mesurée avec une grande précision (à 1 ou 2 millionnièmes près), se montre légèrement inférieure à la densité normale; la réduction relative de densité d'environ  $13 \cdot 10^{-6}$  est conforme à celle que laisse prévoir la théorie.

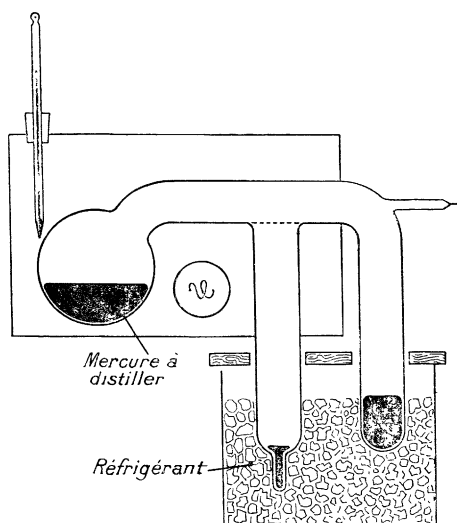


Fig. 2.

d) *Distillation irréversible sous basse pression.* — Cette méthode consiste à recueillir les molécules qui s'échappent du liquide dans des conditions telles que leur retour à la surface d'évaporation soit empêché, de

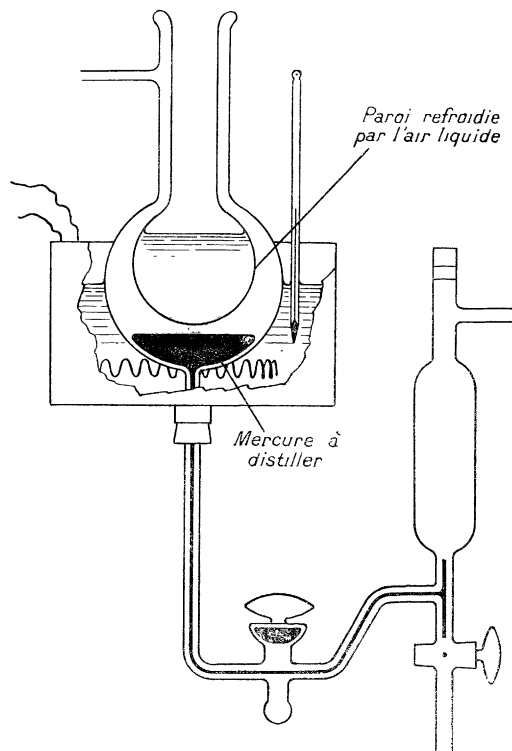


Fig. 3.

sorte qu'il ne puisse y avoir, comme dans la distillation ordinaire, un équilibre de régime entre les molécules évaporées et les molécules recondensées. Bronsted et Hevesy ont résolu ce problème en effectuant la distillation sous basse pression en absence de gaz étrangers et en recevant le courant de molécules évaporées sur une paroi froide qui les capte et les condense (fig. 3). Le succès de l'opération exige que, sur leur trajet vers la paroi froide, les molécules ne puissent subir de choc dans le gaz et être renvoyées en arrière. Il est nécessaire, de plus, que la vitesse d'évaporation ne soit pas trop grande, afin que la composition du liquide à la surface puisse être maintenue constante par le jeu de la diffusion

au sein du liquide. Cette méthode a été appliquée avec succès à la distillation du mercure ; l'écart maximum de densité obtenu atteint 0,5 pour 1000, avec réduction de volume 13500. La même méthode a été appliquée à une solution de gaz chlorhydrique dans l'eau à 50 degrés ; elle a conduit à un écart de 0,024 unité de poids atomique sur le chlore. L'expérimentation avec le mercure, reprise par plusieurs savants (Harkins, Mulliken et d'autres), a entièrement confirmé la possibilité d'une séparation à l'aide de cette méthode.

La théorie de l'expérience est la même que celle de l'effusion. La surface du liquide agit comme une membrane, qui laisse passer au travers d'interstices moléculaires les molécules qui s'évaporent. Pour la séparation de gaz non isotopes, cette méthode pourrait être très supérieure aux procédés de distillation jusqu'ici employés.

e) *Vitesse de réaction chimique.* — J.-J. Thomson a proposé d'utiliser la vitesse d'agitation moléculaire comme élément déterminant de réactions chimiques. Si, par exemple, on fait passer un courant de gaz chlorhydrique sur une solution alcaline, les molécules plus légères pourraient être absorbées de préférence, et la composition du résidu pourrait être modifiée; l'expérience a été tentée par Ludlam avec résultat négatif; il en a été de même pour un essai de captation de chlore par le gaz ammoniac résultant de la dissociation du chlorure d'ammonium.

Hevesy a suggéré une expérience qui consisterait à faire passer un courant de chlore dans un tube d'argent, avec l'espoir d'un avantage d'absorption pour  $\text{Cl}_{35}$ ; l'expérience n'a pas été tentée. Rappelons, par contre, que les réactions chimiques se sont montrées jusqu'ici inefficaces pour la séparation des radioéléments. On doit donc penser qu'il est très difficile de réaliser les conditions qui permettraient de profiter de la différence des vitesses moléculaires au moment où une réaction chimique doit se produire. De plus, nous ignorons totalement quelles sont les conditions pour qu'un choc soit efficace et conduise à la réaction chimique; l'efficacité même du choc pourrait être une fonction de la vitesse moléculaire.

5. *Méthode photochimique.* — Merton et Hartley ont proposé une méthode basée sur l'absorption de radiations infra-rouges par les molécules. Le chlore naturel se compose de trois espèces de molécules  $\text{Cl}_{35}^2$ ,  $\text{Cl}_{35}\text{Cl}_{37}$ ,  $\text{Cl}_{37}^2$ , en proportions relatives 9 à 6 à 1. Si on attribue des fréquences différentes à la lumière absorbée par ces trois espèces de molécules, on conçoit qu'après la traversée d'une épaisseur notable de chlore la radiation incidente se trouve surtout privée de la fréquence absorbée par  $\text{Cl}_{35}^2$ , et contienne en excès la fréquence qui correspond à  $\text{Cl}_{37}^2$ . En recevant la radiation ainsi filtrée dans un mélange de chlore et d'hydrogène on peut espérer favoriser la formation de  $\text{HCl}_{37}$  et, sous des conditions favorables, on pourrait obtenir une séparation complète. L'expérience a été tentée avec résultat entièrement négatif, et il faut dire que le problème comporte une grande part d'inconnu relativement aux fréquences présumées et à leur intervention dans la réaction chimique.

6. *Rayons positifs.* — Une méthode particulièrement séduisante consisterait à utiliser la séparation des isotopes dans les appareils destinés à l'analyse des masses, et à capter séparément les molécules de chaque espèce qui viennent produire une image en un point déterminé de la plaque photographique, ou bien qui pénètrent dans la chambre de réception électrométrique pour une valeur du potentiel déterminée. L'avantage



considérable du procédé serait de réaliser une séparation complète. Les prévisions d'Aston à ce sujet ne sont pas très encourageantes ; ce savant calcule que pour un fonctionnement normal de son tube à gaz on pourrait obtenir en 100 secondes  $0,4 \text{ mm}^3$  de  $\text{Ne}_{20}$  et  $0,01 \text{ mm}^3$  de  $\text{Ne}_{22}$  ; il pense, de plus, que les difficultés de captation peuvent être considérables. Toutefois, la situation pourrait être différente pour un élément plus facile à condenser ou ayant des affinités chimiques (mercure sur or., etc.) peut être aussi arrivera-t-on à augmenter le débit de rayons, soit dans un tube à gaz, soit à l'aide de rayons anodiques. Il semble qu'on doive conserver bon espoir de ce côté.

#### CONCLUSION.

Nous voyons comment les vues théoriques clairvoyantes de savants éminents, soutenues par un effort considérable de recherches expérimentales, ont abouti à établir sur des bases solides la notion générale de l'isotopie des éléments chimiques. Nous assistons là à un de ces élargissements d'horizon, vastes et rapides, auxquels nous a habitué le merveilleux développement du domaine physico-chimique moderne. Si l'isotopie par elle-même est un fait acquis, la possibilité de séparation des isotopes est également démontrée, bien que les résultats obtenus jusqu'ici soient encore très restreints. La constance de proportions des mélanges isotopiques naturels est aussi un fait qui mérite la plus grande attention, puisqu'il se rattache à l'histoire du passé éloigné de la terre. Il ne semble pas douteux que la production de ces mélanges ait été soumise à des lois auxquelles est due cette constance remarquable. Mais si l'effort humain, aux moyens limités, s'est montré capable d'obtenir une séparation partielle des isotopes, comment ne penserions-nous pas que la nature, qui dispose de moyens autrement puissants et qui a pour elle ce facteur considérable qu'est le temps, n'ait point réalisé elle-même sous certaines conditions une séparation partielle ou peut-être totale ? Ainsi se trouve soutenu et augmenté l'intérêt déjà si justifié qu'attachent les chimistes à la détermination précise des poids atomiques. Bien que ceux-ci n'aient plus la signification simple et primordiale qu'on leur attribuait jusqu'ici, ce n'en est pas moins une nécessité urgente d'appliquer à leur connaissance les méthodes de la haute précision, en y joignant le souci nouveau de la *provenance* de toute matière soumise à l'expérimentation, ainsi que des procédés employés pour la purification. C'est là une nouvelle tâche dont on doit attendre à l'avenir des informations importantes, et à laquelle ne manqueront pas de faire face les laboratoires dont les travaux, souvent ardues et pénibles, ont seuls permis d'établir la belle généralisation exposée dans cet article,

Manuscrit reçu le 23 août 1923.