

LES RADIO-ÉLÉMENTS ET LEUR CLASSIFICATION*

Dans les exposés généraux ayant pour objet la Radioactivité, l'intérêt est le plus souvent attiré par les manifestations d'ordre physique auxquelles donnent lieu les corps radioactifs. Certes, il est impossible de perdre de vue le fait que les phénomènes radioactifs ont conduit à la découverte d'éléments nouveaux, en particulier du radium dont l'individualité chimique ne saurait plus être contestée. On ne peut pas non plus éviter d'être frappé par le fait fondamental de la production d'hélium par les corps radioactifs, production qui nous offre pour la première fois l'exemple d'une transformation d'atome. Mais cette découverte, admise sans réserve par tous les savants qui s'occupent de radioactivité, n'a pas encore acquis les droits d'une certitude absolue chez tous les physiciens et surtout chez tous les chimistes. De plus, même à ceux qui lui font crédit, elle apparaîtrait plutôt comme un fait isolé, tandis que l'ensemble des transformations radioactives conserve encore pour eux un caractère en quelque sorte irréel, procédant de l'interprétation ou de la spéculation ingénieuse, plutôt que d'une déduction fondée sur une base expérimentale solide.

Ainsi, alors que la connaissance des rayons du radium commence à être assez répandue et que leurs propriétés biologiques, par exemple, ont été si bien établies que, par suite de la demande des hôpitaux, une véritable crise se produit actuellement dans l'industrie du radium, l'importance profonde et fondamentale des phénomènes radioactifs en Chimie n'a pas encore été reconnue avec l'ampleur qu'elle comporte, ne s'est pas encore imposée aux esprits avec toute l'évidence dont elle porte cependant les caractères.

La raison en est facile à voir. Ce n'est pas la hardiesse qui aurait manqué, je crois, pour accepter les résultats nouveaux. D'ailleurs, les rêves de transformation d'atomes ont, à diverses époques, hanté de nombreux physiciens ou chimistes. Il faut plutôt convenir que la difficulté est dans le caractère déconcertant de la nouvelle chimie des corps radioactifs, cette chimie de l'Invi-

* [Mme Curie, *Revue du mois* (1914) — ed.].

sible qui semble tenir de la fantasmagorie, et où cependant aucun pas n'a été fait sans contrôle rigoureux et renouvelable à volonté.

La connexion entre la Physique et la Chimie est fort étroite, malgré la spécialisation de ces deux sciences, surtout de la dernière. La plupart des progrès importants en Chimie ont été réalisés grâce à des idées ou découvertes du domaine de la Physique. Il suffit de rappeler le rôle des hypothèses moléculaire et atomique, de la loi d'Avogadro, de l'analyse spectrale, des lois de symétrie. De même, c'est souvent au physicien qu'incombe la tâche d'élaborer la technique qui sera utilisée par le chimiste. La balance et le spectroscope ont ainsi été mis successivement au service des laboratoires de chimie. La technique de séparation des gaz de l'atmosphère se compose d'expériences de physique délicates. Les mesures optiques sont entrées en usage, et il commence à en être de même pour les mesures de magnétisme.

Il ne semble pas douteux que nous assistions, dans le cas de la radioactivité, à un exemple analogue. La découverte de cette nouvelle propriété de la matière, consistant en l'émission spontanée de radiations particulières, a permis de créer une technique d'investigation des atomes auxquels la propriété est essentiellement liée. Cette nouvelle technique utilise des appareils jusque-là réservés au physicien; l'électromètre y remplace le plus souvent la balance. Mais comme les résultats obtenus sont de la plus haute portée au point de vue de la Chimie pure, il faut bien que celle-ci accueille les nouvelles idées directrices et qu'elle accorde aux nouvelles méthodes expérimentales la même confiance qu'à celles dont elle disposait jusqu'ici.

L'hypothèse d'après laquelle *la Radioactivité est une propriété atomique de la matière*¹ a permis d'établir une méthode de recherche d'éléments nouveaux basée sur cette propriété. Les premiers corps ainsi découverts par P. Curie et moi furent le polonium et le radium; mais, dans la suite, de nombreux travaux conduisirent à envisager l'existence d'une trentaine d'éléments radioactifs et à établir de plus que ces éléments ne sont pas stables, mais éprouvent au cours du temps une destruction spontanée². Le nombre grandissant de ces substances éphémères n'a pas été d'abord sans inspirer quelque inquiétude au sujet de leur nature. Mais les résultats continuant à se préciser de la manière la plus cohérente, l'inquiétude a fait place à une sécurité croissante. Les quantités d'éléments radioactifs qui entrent en jeu sont toujours très petites, sauf dans le cas de l'uranium et du thorium. Le radium, qui a pu être isolé à l'état de sel pur, fait l'objet d'une fabrication industrielle; il est couramment manié par quantités qui n'atteignent généralement pas 1g. Les autres corps radioactifs sont généralement présents en quantités beaucoup plus faibles encore, de l'ordre, dans bien des cas, d'une très petite fraction de milligramme (au-des-

¹ Mme Curie, *Comptes rendus*, 1898; *Revue Générale des Sciences*, janvier 1899 [voir p. 60 — ed.].

² Voir De biérne, *Conférences de la Société de Physique*, 1913.

sous du millionième, par exemple). Cependant, grâce au perfectionnement et à l'application systématique de méthodes de recherches convenables¹, nous pensons connaître les caractères chimiques principaux des éléments radioactifs, et il a été récemment possible de procéder à leur introduction dans le tableau de la classification périodique des éléments, dans lequel le radium avait, d'ailleurs, le premier facilement trouvé place, à la suite du travail qui a fixé son individualité chimique².

Il semble donc utile actuellement de faire une synthèse résumant nos connaissances sur la nature des atomes radioactifs. Tel est l'objet de cette conférence. Je me propose, en même temps, de montrer comment l'étude des corps radioactifs, jointe à d'autres recherches récentes, a permis d'acquérir quelques notions sur la structure des atomes, structure qui nous était totalement inconnue jusqu'à ces derniers temps.

Dans cet exposé, je supposerai connue, dans la plupart des points, la théorie des transformations radioactives et la nature des rayons émis par les corps radioactifs, ces deux sujets ayant été traités dans les *Conférences de la Société de Physique* de 1913³.

* * *

Le nombre des éléments connus avant la découverte de la Radioactivité est d'environ 80. Tous ces éléments peuvent, comme on sait, être disposés par ordre de poids atomique croissant (Tableau I)⁴, en plusieurs rangées superposées formant le Tableau de Classification dite *périodique* de Mendeleeff. Dans chacune des huit colonnes du Tableau, numérotées de 0 à VII, se trouvent réunis des éléments de même valence et de nature chimique analogue. La classification est loin d'offrir une harmonie parfaite, cependant elle réussit à mettre en évidence la parenté chimique des éléments et à prouver que celle-ci est déterminée par certaines lois générales encore inconnues. Les analogies deviennent plus visibles quand on fait alterner les termes d'une même colonne à partir du troisième rang, en les plaçant alternativement à droite et à gauche de manière à réaliser une bifurcation. Le déplacement d'une place dans l'ordre des poids atomiques croissants correspond, en général, au passage dans la colonne voisine, accompagné d'un changement de valence et de propriétés chimiques. Cependant les éléments dits «terres rares» jouent un rôle exceptionnel: ils ont des propriétés chimiques voisines, bien qu'ils se suivent, dans l'ordre des poids atomiques, dans l'intervalle compris entre le baryum et le tantale; aussi les sépare-t-on généralement de l'ensemble du Tableau. La colonne VIII a été formée avec des éléments dont la disposition est particulière;

¹ Voir Mme Curie, *Les mesures en Radioactivité* (*Journal de Physique*, 1912) [voir p. 398 — ed.].

² Mme Curie, *Thèse de Doctorat*, Paris, 1903 [voir p. 139 — ed.].

³ Mme Curie, A. Debierne.

⁴ Voir les Tableaux à la fin de l'article, p. 489, 491 et 492.

ils sont rangés par groupe de trois, chaque groupe jouant en quelque sorte le rôle d'un élément unique, comme le groupe des terres rares.

De nombreuses places vides existaient encore dans le Tableau; en particulier les deux dernières rangées étaient très incomplètes. La dernière de toutes ne comprenait que l'uranium et le thorium, corps possédant les poids atomiques les plus élevés (238,5 et 232,4). De tous les éléments de l'ancien Tableau, ces deux éléments seuls ont été reconnus radioactifs. Leur rayonnement peu intense a pu longtemps échapper à l'observation, et c'est seulement après la découverte des rayons Röntgen que la recherche d'un phénomène analogue dans les corps phosphorescents conduisit Henri Becquerel à la découverte des rayons uraniques¹. Deux ans après, la même propriété fut mise en évidence pour le thorium².

Parmi les places qui restaient vides dans le Tableau, plusieurs conviennent à des éléments radioactifs. En particulier, j'ai pu prouver par l'ensemble de mes travaux sur le radium que cet élément vient tout naturellement occuper la place libre de la dernière rangée, dans la colonne des métaux alcalino-terreux, comme homologue supérieur du baryum. Nous verrons que des conclusions extrêmement probables peuvent être obtenues relativement à d'autres corps radioactifs, bien que la démonstration n'ait pu être aussi absolue que dans le cas du radium. Non seulement le Tableau se trouve ainsi complété, mais, de plus, la connaissance du mécanisme des transformations radioactives nous apparaît comme le premier fil conducteur, pour arriver à pénétrer le sens profond de la Classification des éléments.

Avant de m'occuper des relations qui existent entre le Tableau des éléments et les éléments radioactifs nouveaux, j'envisagerai le classement possible de ces derniers. Un tel classement peut être entrepris de différentes manières.

1° On peut, en premier lieu, accorder l'attention à la valeur de la *vie moyenne* des corps radioactifs. On sait qu'aucun de ces corps n'est stable, mais que chacun se détruit spontanément, suivant la loi exponentielle bien connue. Bien que les différents atomes d'une substance radioactive simple puissent exister pendant des temps, très variables de l'un à l'autre, il existe néanmoins pour chacune de ces substances une constante de temps fondamentale et parfaitement définie qui est la vie moyenne θ d'un grand nombre d'atomes de cette espèce. Au lieu de la vie moyenne θ , on utilise souvent une autre constante T qui lui est proportionnelle: c'est le temps nécessaire pour qu'une quantité quelconque de la substance considérée diminue de la moitié de sa valeur. Ce temps se nomme *période*. La vie moyenne et la période peuvent prendre des valeurs extrêmement différentes comme ordre de grandeur. La plus courte des périodes mesurées est 0,002 seconde (actinium A). Les périodes les plus

¹ H. Becquerel, *Comptes rendus*, 1896.

² Mme Curie, *Comptes rendus*, 1898 [voir p. 43 — ed.].

longues dont la connaissance approximative résulte de données indirectes, mais méritant confiance, sont celles de l'uranium et du thorium (de l'ordre de 10^9 et 10^{10} ans).

Il est bien évident que la période d'une substance joue au point de vue pratique un rôle très important, et même à certains points de vue décisif. C'est elle qui détermine pour nous la possibilité de séparer une substance radioactive à l'état pur en quantité suffisante pour l'observation du spectre et la détermination du poids atomique. Une substance telle que l'uranium est pratiquement invariable et forme la majeure partie de certains minéraux. Mais les substances qui dérivent de l'uranium par transformation radioactive ont des périodes plus courtes et, conformément à la théorie, se trouvent présentes dans le même minerai en proportion pratiquement constante, proportionnelle à la période, la destruction spontanée étant compensée par la production continue à partir de la substance mère. Pour la plupart des corps, la réduction est considérable, de sorte que les corps radioactifs nouveaux ne sont présents dans les minerais d'urane et de thorium qu'en proportion minime. De plus, quand la substance recherchée est séparée de la substance mère, la destruction n'est plus compensée par la production et la quantité diminue d'autant plus vite que la période est plus courte. Pour ces deux raisons, quand la période descend au-dessous d'une certaine valeur, les difficultés de l'extraction et de la purification de la substance deviennent insurmontables. Ces difficultés varient, d'ailleurs, évidemment avec les propriétés chimiques de la substance.

A de nombreux points de vue, l'importance prépondérante sera donc réservée aux corps radioactifs de longue période. Tels sont l'uranium, le thorium, le radium, l'ionium, l'actinium et, dans une moindre mesure, le radium D, le mésothorium, le radiothorium, le polonium. Mais, d'autre part, la grandeur de la période n'apparaît pas jusqu'à présent comme liée à la nature chimique de l'élément et ne semble pas intervenir dans les analogies chimiques; elle ne peut, actuellement au moins, être utilisée pour les expliquer.

2° Si l'on considère l'état physique des corps radioactifs, l'expérience montre qu'il en existe de solides et de gazeux. Il n'est pas possible d'affirmer qu'il n'y en a pas de liquides, mais comme il n'y a non plus aucune raison pour le supposer, cette considération peut être laissée de côté.

Les trois gaz radioactifs connus ont reçu le nom d'*émanations* radioactives. Ils sont produits par le radium, le thorium et l'actinium. Grâce à leur état, il est possible de les séparer de ces corps par simple aspiration du gaz qui les entoure. Cette circonstance a grandement facilité leur étude, bien que leurs périodes ne soient pas longues. Les émanations sont considérées comme des gaz inertes, car il n'a pas été possible de les faire entrer en combinaison chimique. Elles se condensent à basse température, par exemple à la température de l'air liquide, et ce phénomène de condensation a pu être

utilisé pour la purification. Celle-ci a été réalisée pour l'émanation du radium dont la période est de 3,85 jours, tandis que les périodes des deux autres émanations sont de 53 secondes et 3,9 secondes seulement. Après le radium, l'émanation du radium est le corps pour lequel les résultats les plus définis ont été obtenus; on a pu faire l'étude complète du spectre, la mesure assez précise du volume de gaz en équilibre avec 1^g de radium (volume d'un *curie*), la détermination approchée des constantes critiques et de la température d'ébullition, la détermination du poids atomique par une méthode indirecte et même par voie de pesée directe (Rutherford, Debierne, Ramsay)¹.

L'apparition de gaz radioactifs dans la série des transformations du radium, du thorium et de l'actinium marque une sorte de coupure de grande importance pratique. Ces gaz pouvant être facilement extraits des substances mères, les produits solides de leur destruction spontanée peuvent être recueillis à volonté sur des parois solides qui se trouvent en contact avec eux, exactement comme cela arriverait pour des poussières ou des gouttelettes ténues, en suspension dans un gaz. L'ensemble des produits de transformation d'une émanation constitue ce qu'on nomme son *dépôt actif*; celui-ci est composé de plusieurs substances distinctes.

3° Un mode de classement, particulièrement intéressant au point de vue de la théorie des transformations radioactives, consiste à grouper les éléments radioactifs en familles, par ordre de filiation. Ces familles sont au nombre de trois, les trois têtes de série étant l'uranium, le thorium et l'actinium. Il est cependant probable que le raccord de la famille de l'actinium avec celle de l'uranium ne manquera pas d'être réalisé, de même qu'il a déjà été établi que la famille du radium dérive de l'uranium. Les trois familles ont été représentées dans le Tableau II. Pour chaque corps, on a indiqué la valeur de la période ainsi que le mode de rayonnement α , β et γ . Quand la période n'est connue qu'indirectement, le nombre est accompagné d'un point d'interrogation. Quand la transformation est multiple, ainsi que cela a lieu dans quelques cas, l'indication du rayonnement caractéristique est donnée séparément pour chaque branche.

L'examen du Tableau fait ressortir l'analogie profonde qui existe dans la succession des transformations pour les trois familles. Cette analogie qui a clairement apparu dans l'existence de trois émanations, mais qui ensuite a été souvent troublée au cours des recherches par des découvertes de corps ou rayons nouveaux, a pu, chaque fois, être rétablie par un examen plus approfondi, et paraît réellement fondamentale. A partir du terme gazeux, on voit le même mode d'évolution à quatre termes se répéter trois fois, les termes qui se correspondent étant caractérisés par des rayons de même espèce, bien que les périodes soient différentes.

¹ Debierne, *Conférences de la Société de Physique*, 1913.

Cette analogie de rayonnement répond à une analogie dans la transformation de l'atome. Une émission de rayons α consiste en l'expulsion violente d'un atome d'hélium, accompagnée du recul de l'atome restant, lequel, en ce cas, acquiert une énergie cinétique suffisante pour pouvoir être recueilli à une certaine distance de la source, si la projection a lieu dans le vide (rayons α); la masse atomique de cet atome résultant est inférieure d'environ quatre unités à celle de l'atome qui a subi la transformation ($\text{He} = 3,99$).

L'émission de rayons β consiste en une expulsion d'électrons. La perte d'un électron n'entraîne pas pour l'atome un changement de masse appréciable. Cependant les propriétés de celui-ci se trouvent profondément modifiées. Il s'agit donc de l'émission d'un électron *essentiel* et non d'une émission d'électrons *périphériques*, comme dans le cas où l'atome est simplement ionisé. Je reviendrai encore sur ce point dans la suite.

Dans une transformation à rayons β la substance mère et l'élément dérivé peuvent être considérés comme offrant une *isométrie atomique* spéciale, analogue à une isométrie moléculaire.

L'expérience a montré que *les termes qui se correspondent par leur rayonnement ont aussi entre eux*, comme les émanations, *une analogie chimique* et doivent être considérés comme faisant partie d'un même groupe chimique.

Entre les termes qui précèdent les émanations, les mêmes analogies se manifestent, mais on manque encore de données pour établir toutes les correspondances. Aux deux termes RaC, ThC, une bifurcation se produit, la transformation ayant lieu pour ces corps de deux manières différentes. Il en est probablement de même pour l'actinium C, et il est possible que la correspondance se retrouve au delà de ces bifurcations.

* * *

Examinons maintenant quelle est la source de nos renseignements sur la nature chimique des éléments radioactifs, et comment on a pu établir qu'à une position analogue dans la série des transformations radioactives correspond une analogie de propriétés chimiques.

Si l'on met à part l'uranium et le thorium dont l'étude chimique est antérieure à la découverte de la Radioactivité, on peut dire qu'en règle générale les éléments radioactifs ne peuvent être étudiés sans le secours des méthodes spéciales à cette science.

Une substance radioactive, présente en quantité trop faible pour être séparée et pesée, peut néanmoins posséder un rayonnement suffisamment intense pour être mesuré avec précision par la méthode électrométrique bien connue. Pour identifier une substance radioactive, on se base sur l'analyse de son rayonnement (rayons α simples ou complexes de divers parcours, rayons β et γ de diverses vitesses ou pouvoirs pénétrants), et sur la loi d'évolution de l'activité avec le temps. Ces deux modes de recherche convenable-

ment appliqués conduisent à des résultats d'une sécurité et d'une régularité absolues; ils permettent de décider si la substance est simple ou complexe. Dans le cas d'une substance simple, le rayonnement est proportionnel à la quantité et peut servir à la mesurer; il en est encore de même pour certaines substances complexes si les conditions de mesures ont été convenablement choisies. On a ainsi le moyen de suivre une trace infinitésimale de matière radioactive noyée au sein d'autre matière, — et cela est tellement vrai que certaines opérations sont plus faciles avec les corps radioactifs qu'avec les corps inactifs. Ainsi, il est beaucoup plus aisé de suivre les progrès de la diffusion d'un gaz radioactif le long d'un tube étroit que d'en faire autant pour un gaz ordinaire.

La sensibilité des méthodes de mesures utilisées en radioactivité est très grande. Elle permet de doser des quantités de radium de l'ordre, par exemple, de 10^{-10} g, ou des quantités d'émanation de l'ordre de 10^{-10} mm³. Pour les corps à vie moyenne très brève, la sensibilité est encore considérablement plus grande. On peut calculer qu'une quantité de radium C de l'ordre de 10^{-16} g (soit environ 2 millions d'atomes de cette substance) produit dans un appareil de mesures un courant assez intense (de l'ordre de 10^{-11} ampère), comparable à celui que l'on obtient avec un disque étalon à oxyde d'urane de dimensions ordinaires (quelques centimètres de diamètre).

Il s'agit maintenant de savoir ce que l'on doit penser des propriétés chimiques des corps radioactifs. Quand, ayant fait l'hypothèse de l'existence d'éléments radioactifs nouveaux dans les minéraux d'urane, j'ai résolu de chercher à extraire ces corps par les procédés de l'analyse chimique, en m'aidant de la mesure du rayonnement, faute d'autre indication, j'ai supposé implicitement que les propriétés chimiques des éléments hypothétiques étaient bien existantes et je ne pensais pas que ces propriétés aient pu faire défaut, soit parce qu'il s'agissait d'éléments radioactifs, soit parce que ces éléments ne pouvaient être présents en quantité quelque peu notable. C'est en partant de cette conviction qu'a été établie la méthode de recherches qui nous a conduits, P. Curie et moi, à la découverte du radium et du polonium, et qui, généralisée et développée depuis, a permis de découvrir les autres radio-éléments. Au cours du travail, un corps radioactif, le radium, se séparait avec le baryum de tous les autres éléments présents en grand nombre, mais ne se séparait du baryum que par des cristallisations ou précipitations fractionnées. Nous en avons conclu, P. Curie et moi, que le radium avait une parenté étroite avec le baryum et cette opinion a été absolument vérifiée par mes travaux sur l'isolement de sels de radium purs et la détermination du poids atomique, ainsi que par les propriétés du radium métallique que j'ai isolé plus tard en collaboration avec M. Debierne. On a, de plus, trouvé que le spectre du radium est du même type que celui des métaux alcalino-terreux et que les sels de radium et de baryum sont isomorphes. Il était donc bien établi *que l'on avait*

pu juger de la nature chimique d'un élément présent en proportion infinitésimale, d'après la manière dont cet élément se comportait en présence simultanée d'autres éléments variés.

On peut cependant affirmer que la quantité de radium qui se trouve dans les solutions de minerai d'urane est trop faible pour que ce corps considéré isolément puisse précipiter à l'état de sel insoluble. On ne peut guère envisager la possibilité de solubilités aussi faibles. Les réactions du radium se trouvent, dans le cas considéré, déterminées par la présence, en quantité suffisante, de l'élément baryum, de sorte qu'il y a *entraînement* de radium par le baryum. Il convient dès lors de se poser la question si une autre substance ne pourrait jouer le même rôle et induire l'expérimentateur en erreur. Cela est certainement possible, et l'on en connaît des exemples tels que l'entraînement de fer avec le sulfate de baryum ou l'entraînement de diverses matières par le charbon. Ces phénomènes désignés sous le nom d'*adsorption* existent sans nul doute, et l'on doit en tenir compte, mais on peut, en général, les distinguer de l'entraînement par réelle analogie chimique, effet observé sur des substances susceptibles de cristalliser ensemble en toute proportion, cette faculté pouvant aller jusqu'à l'isomorphisme complet.

L'adsorption est un effet de surface que l'on peut empêcher en adjoignant, à la substance présente à l'état de trace, une quantité suffisante de substance ayant avec elle une parenté chimique étroite, sur laquelle portera désormais l'entraînement. C'est ainsi que l'adsorption de l'uranium X par le charbon est empêchée par l'addition de thorium dont l'uranium X partage les propriétés chimiques. En effectuant des essais variés, on peut donc se rendre compte des caractères chimiques des substances radioactives, par le seul usage de réactions chimiques¹. La tâche est d'autant plus aisée que les propriétés de l'élément considéré sont plus franches; elles n'ont pas prêté à équivoque dans le cas du radium. Dans d'autres cas les difficultés ont été plus grandes et il a fallu plus d'expériences pour se faire une opinion (polonium, actinium). Les expériences qui méritent particulièrement confiance sont, dans tous les cas, celles qui comportent la cristallisation en commun des substances dont on compare les propriétés.

Bien que la méthode de réactions chimiques et de cristallisation puisse nous renseigner sur les propriétés chimiques des radio-éléments, il est néanmoins fort heureux que les conclusions de cette méthode aient pu être confirmées récemment par une voie différente, empruntée à l'Électrochimie.

On sait depuis assez longtemps que les éléments radioactifs peuvent, comme les éléments ordinaires, subir l'électrolyse ainsi qu'être déplacés de leurs solutions par des métaux convenablement choisis (Marckwald, v. Lerch).

¹ Voir Mme Curie, *Traité de Radioactivité*, 1910. — E. Soddy, *Chimie des radio-éléments*.

Ces éléments, sauf les émanations, se comportent au point de vue électrochimique comme des métaux, et l'on a pu se rendre compte qu'ils affectent un caractère électrochimique défini. En particulier, les dépôts actifs des émanations radioactives peuvent être dissous dans les acides concentrés ou dilués, et dans ces solutions, on peut précipiter leurs constituants, d'une manière plus ou moins complète, sur des lames de métaux convenablement choisis, plongées dans la solution.

Des recherches récentes ont permis de préciser le caractère électrochimique des corps radioactifs et de fixer leurs places dans la série de Volta¹. L'expérience était faite en comparant les quantités de deux substances radioactives qui se déposent d'une solution commune sur une électrode ayant, par rapport à cette solution, un potentiel déterminé; on utilisait généralement une électrode de métal plongeant dans la solution d'un de ses sels. Les résultats obtenus ont permis de classer les éléments radioactifs conformément à leur caractère électrochimique, et ont prouvé que les termes correspondants des familles radioactives se comportent à ce point de vue de la même manière. La série comprend des termes fortement oxydables, comme le radium, des termes très facilement réduits, comme le polonium, et des termes intermédiaires.

D'autres résultats intéressants ont été obtenus relativement à la *valence* des radio-éléments². Celle-ci peut, comme on sait, être déduite de la formule de Nernst quand on connaît le coefficient de diffusion d'un électrolyte et les mobilités des deux ions qui le constituent. Quand la substance étudiée est mélangée en très petite proportion à un électrolyte de même anion, la valence du cation présent à l'état de traces se détermine plus simplement par la connaissance du rapport de son coefficient de diffusion D à sa mobilité K , la diffusion ayant lieu, en ce cas, de la même manière que pour un gaz, suivant la relation

$$\frac{D}{K} = \frac{RT}{nF},$$

où n est la valeur cherchée, $F = 96\,500$ coulombs est la valeur du Faraday, R est la constante des gaz parfaits par molécule-gramme, et T la température absolue. Les substances radioactives se comportent, en général, d'une manière normale comme des électrolytes, en ce qui concerne la diffusion et le transport dans un champ électrique, bien que, dans certains cas, on ait aussi observé la tendance à la formation d'agréats colloïdaux. Le coefficient de diffusion et la mobilité peuvent être déterminés facilement par des méthodes appropriées, dans lesquelles l'évaluation de la concentration de la matière et de son déplacement se font dans de bonnes conditions au moyen de mesures

¹ Hevesy, *Le Radium*, 1913.

² Hevesy, *Phys. Zeit.*, 1913.

de radioactivité. On constate d'ailleurs que les coefficients de mobilité des ions radioactifs sont peu différents entre eux et restent compris entre les mêmes limites que ceux des ions métaux non actifs. Il en résulte que la valeur du coefficient de diffusion seule permet, en général, de déterminer la valence. On trouve que *les termes correspondants des familles de radio-éléments sont caractérisés par la même valence*. De plus, *cette valence est précisément la même que celle que l'on avait pu prévoir d'après l'étude des propriétés chimiques*.

Ainsi l'ensemble des données fournies par l'application des méthodes électrochimiques à l'étude des radio-éléments confirme d'une manière remarquable la conviction que ces éléments possèdent une individualité chimique bien définie et ne se distinguent pas, à ce point de vue, des éléments ordinaires. De plus, l'analogie entre les termes correspondants des familles radioactives apparaît encore plus frappante, puisqu'il est prouvé qu'elle comprend leurs propriétés chimiques et électrochimiques aussi bien que leur rayonnement. On peut en conclure que toute classification rationnelle des radio-éléments ne peut manquer d'être basée sur une analogie aussi profonde.

* * *

On conçoit que l'accumulation de données expérimentales cohérentes relatives à la nature des radio-éléments, ainsi que la manifestation de plus en plus évidente de régularités remarquables, aient fait naître le besoin de réaliser une synthèse permettant de classer ces éléments et de les rattacher à ceux précédemment connus. Cet effort a été fait indépendamment de plusieurs côtés, notamment par M. F. Soddy et par M. Fajans, et a conduit au même résultat. *Il a été prouvé que les propriétés des radio-éléments permettent de les ranger dans le Tableau de la Classification des éléments d'une manière cohérente et logique¹*.

Cette belle généralisation a pu être réalisée grâce à un examen attentif qui a conduit à établir quelques propositions importantes que voici :

1° *Quand une transformation radioactive a lieu avec émission de rayons α , l'élément qui en résulte, et dont le poids atomique est de quatre unités inférieur à celui de la substance mère, est déplacé, par rapport à celle-ci, de deux colonnes, dans le sens des poids atomiques décroissants, une colonne étant toujours sautée.*

2° *Quand une transformation radioactive a lieu sans émission de rayons α , l'élément qui en résulte a le même poids atomique que la substance mère; il est déplacé, par rapport à celle-ci, d'une seule colonne dans le sens des poids atomiques croissants.*

Cette règle s'applique aux transformations qui comportent l'émission de rayons β ou γ et à celles dites « sans rayons », lesquelles d'ailleurs sont probablement accompagnées d'une faible émission de rayons β .

¹ Voir les Tableaux p. 489, 491 et 492.

On a aussi fait observer que, dans une transformation à rayons α , l'élément produit est, en règle générale, plus électropositif que la substance mère, tandis que l'inverse se produit dans une transformation à rayons β (Fajans). La règle est applicable dans une même rangée, sans tenir compte des émanations.

Les règles indiquées ont été inspirées par des exemples simples. C'est ainsi que le radium, de poids atomique 226, dont la place dans le système périodique est connue dans la colonne II des métaux alcalino-terreux, perdant une particule α , donne naissance à l'émanation, gaz inerte de poids atomique 222, dont la place est indiquée dans la même rangée et dans la colonne 0 des gaz inertes. On raisonne de même quand le poids atomique n'a pas été déterminé, mais que les propriétés chimiques et électrochimiques permettent de choisir la colonne qui convient à un élément. Ainsi le radiothorium, corps analogue au thorium et ayant, par suite, sa place dans la colonne IV, perdant une particule α , donne naissance au thorium X, corps analogue au radium et devant, par suite, être placé dans la colonne II. La règle relative aux rayons β a été trouvée par des raisonnements analogues. Les deux règles se sont montrées susceptibles d'une application générale aux transformations actuellement connues, si cependant on convient de ne pas tenir compte de la colonne VIII, laquelle, d'ailleurs, joue un rôle spécial. Toutes les substances qui émettent des rayons α se trouvent dans les colonnes 0, II, IV et VI, de rang pair, tandis que les substances qui émettent des rayons β sont dans les colonnes II à V. Les colonnes I et VII ne conviennent à aucun des radio-éléments connus.

Il est important de remarquer que, d'après les règles indiquées, une transformation à rayons α correspond à une *diminution de valence de deux unités*, tandis qu'une transformation à rayons β correspond à une *augmentation de valence d'une unité*, si, toutefois, on convient de compter comme valence la principale valence positive (la valence négative étant le complément de celle-ci à 8), telle qu'elle est indiquée par le numéro de la colonne.

Les propositions 1° et 2° permettent de suivre le déplacement des éléments, lors de leur transformations, dans le système de classification. Mais elles ne suffisent pas pour prouver que l'on peut assigner à tous les radio-éléments des places convenables. Pour cela, il faut y joindre une troisième proposition fondamentale:

3° *Les radio-éléments forment des groupes de corps de mêmes propriétés chimiques et électrochimiques, chaque groupe jouant dans le système le rôle d'un élément unique. La similitude des propriétés radioactives indique la réunion dans un même groupe, mais la réciproque n'est pas nécessairement exacte, une substance pouvant repasser plus d'une fois par un groupe lors de son évolution.*

L'idée de réunir les éléments par groupes pour faciliter leur classification n'est pas propre à la radiochimie. On a vu que de tels groupes existaient

déjà dans le système (terres rares et groupes de la colonne VIII). La généralisation de ce procédé permet de réduire le nombre de plus de 30 radio-éléments à 10 groupes qui se placent facilement dans les deux dernières rangées du système. Certains de ces groupes viennent occuper des places vides et représentent, par conséquent, des types chimiques nouveaux; tels sont les groupes du radium, des émanations, du polonium, de l'actinium et de l'uranium X_2 . D'autres groupes viennent se joindre à l'uranium et au thorium ou à des éléments inactifs dont ils partagent les propriétés; ces derniers sont le thallium, le plomb et le bismuth.

Le Tableau I représente le système des éléments dans lequel les lacunes ont été complétées par des radio-éléments de type chimique nouveau, chaque groupe étant indiqué par son représentant le plus important.

Le Tableau III représente séparément les deux dernières rangées du système, avec l'énumération complète de tous les radio-éléments et avec l'indication des transformations radioactives pour les trois familles de radio-éléments. Les transformations ont été indiquées par des flèches, conformément aux règles indiquées plus haut.

Les poids atomiques ne sont connus exactement que pour l'uranium, le thorium, le radium et, avec une certitude un peu moindre, pour l'émanation du radium; pour les autres radio-éléments, les poids atomiques peuvent être calculés par la connaissance de la série des transformations. Les spectres sont connus pour l'uranium, le thorium, le radium et l'émanation du radium; de plus, une raie nouvelle a été observée avec certitude pour le polonium.

Voici la classification des radio-éléments, par groupes de mêmes propriétés chimiques. Les groupes seront désignés par leurs représentants principaux qui sont, pour chaque groupe, les corps dont la vie moyenne est la plus longue. Les six premiers groupes appartiennent à la dernière rangée du système, les quatre suivants à l'avant-dernière. Dans le Tableau II on a indiqué à côté de chaque radio-élément le groupe dont il fait partie.

I. *Groupe de l'uranium*. — Valence 6, colonne VI.

Radio-éléments: Ur I et Ur II.

Corps type: uranium, désigné Ur I, de poids atomique 238,5.

L'existence de l'uranium II résulte d'observations faites sur le rayonnement de l'uranium, mais ce corps n'a pu être séparé de l'uranium I. Sa période a été évaluée indirectement, à l'aide d'une loi empirique qui relie la période d'une substance au parcours des rayons α qu'elle émet.

II. *Groupe du thorium*. — Valence 4, colonne IV.

Radio-éléments: thorium, radiothorium, uranium X_1 , uranium Y, ionium, radioactinium.

Corps type: thorium, poids atomique 232,4.

Le radiothorium est un dérivé du thorium (voir Tableau II) qui n'a pu en être séparé, quand les deux corps sont mélangés, mais que l'on peut néan-

moins obtenir indépendamment du thorium à partir du mésothorium, corps intermédiaire. Période: environ 2 ans.

L'uranium X, est un dérivé de l'uranium qui est entraîné par le thorium dans les réactions de celui-ci et ne peut plus ensuite en être séparé. L'uranium Y (non placé dans le système et dans le Tableau II) accompagne l'uranium X₁, mais s'en distingue par sa vie moyenne et son rayonnement. Sa position dans la série des transformations n'est pas fixée; on l'envisage comme résultant d'une bifurcation dans la transformation de l'uranium I ou de l'uranium II.

L'ionium appartient à la famille de l'uranium bien que sa filiation n'ait pas été démontrée par l'expérience. Elle est prouvée par le fait que l'ionium est la substance mère produisant le radium, dont la provenance de l'uranium ne semble pas douteuse, les deux corps ayant dans leur minéraux un rapport constant, conformément à la théorie des transformations radioactives. L'ionium est inséparable du thorium contenu dans les minerais d'urane. Sa période est probablement de l'ordre de 200 000 ans (d'après le parcours des rayons α). Il doit se trouver dans les minerais d'urane en proportion bien plus forte que le radium, mais n'a cependant pu être isolé. On n'a pas pu non plus observer le spectre de ce corps bien que sa teneur dans les échantillons utilisés ait été estimée à 16 pour 100. Je reviendrai dans la suite sur ce point.

Le radioactinium est un dérivé de l'actinium, ayant une période de 19 jours et demi et possédant les propriétés chimiques du thorium, dont on ne peut l'obtenir séparé qu'en le laissant se produire à partir de l'actinium.

III. Groupe de l'uranium X₂. — Valence 5, colonne V.

Ce corps, dont la période n'est que de 1,1 minute, constitue cependant un type chimique nouveau. Il a été découvert par M. Fajans, à la suite de prévisions formulées par M. Soddy et M. Fajans relativement à l'existence entre l'uranium I et l'uranium X d'un corps intermédiaire dans cette même place du système, avec des propriétés de l'homologue supérieur du tantale. Ce corps est aussi nommé *brevium* et permet de compléter la série de l'uranium, entre celui-ci et l'ionium.

IV. Groupe du radium. — Valence 2, colonne II.

Radio-éléments: radium, mésothorium I, thorium X, actinium X.

Corps type: radium, poids atomique 226, métal alcalino-terreux obtenu à l'état de sels très purs et à l'état métallique; décomposant énergiquement l'eau, conformément à son caractère électropositif. Seul élément radioactif nouveau, extrait des minerais en quantité appréciable, de l'ordre de quelques grammes. Les résultats obtenus pour ce corps ont fourni la base solide sur laquelle se trouvent édifiées la méthode de recherches qui a permis de trouver tous les radioéléments et la théorie atomique de la Radioactivité.

Le mésothorium I est le premier des dérivés du thorium dont il se sépare de la même manière que le radium, de sorte qu'il se trouve avec celui-ci quand

le minerai traité contient du thorium, sans que l'on ait pu, jusqu'à présent, effectuer la séparation. Mais on peut aussi retirer le mésothorium de minerais de thorium ou des composés de thorium du commerce dans lesquels il a pu s'accumuler. Sa période est d'environ 5 ans et demi. Ce corps, accompagné du radiothorium qu'il produit et des dérivés de celui-ci, est utilisé de la même manière que le radium en radiothérapie et, pour cette raison, fait l'objet d'une fabrication industrielle. Son spectre n'est pas encore connu.

Le thorium X et l'actinium X sont les deux corps qui, au point de vue des transformations radioactives, jouent le même rôle que le radium, en ce sens qu'ils donnent directement naissance aux émanations correspondantes.

V. *Groupe de gaz*. — Valence 0, colonne 0.

Radio-éléments: émanations du radium, du thorium, de l'actinium.

Corps type: émanation du radium. Ce gaz a pu être isolé à l'état pur, bien que sa période ne soit que de 3,85 jours. La technique de sa séparation constitue une expérience de physique admirable. Son spectre est très complètement connu; son poids atomique, déterminé par la méthode d'effusion, est égal à 222. Sa température d'ébullition est -65° , sa température critique -104° , sa pression critique environ 60 atm. Seule la méthode de pesée n'a encore pu atteindre ce corps régulièrement, sauf l'expérience isolée de MM. Ramsay et Gray qui ont confirmé la valeur du poids atomique en utilisant une microbalance ultra-sensible.

On obtient couramment de petites bulles d'émanation pure au sein desquelles il n'est pas rare de voir éclater des décharges électriques spontanées. Si ces bulles sont à paroi mince, elles laissent passer les rayons α et, plongées dans l'eau, produisent la décomposition visible de celle-ci. On connaît pour l'émanation du radium le coefficient de solubilité dans l'eau et divers liquides et le coefficient de diffusion dans divers gaz. Le volume de l'émanation en équilibre avec 1g de radium est égal à 0,6mm³.

Les deux autres émanations ont des périodes beaucoup plus courtes et n'ont pu être isolées à l'état pur comme celle du radium.

VI. *Groupe de l'actinium*. — Valence 3, colonne III.

Radio-éléments: actinium, mésothorium II.

Corps type: actinium.

L'actinium est un corps radioactif de type nouveau, se rapprochant surtout de certains éléments du groupe des terres rares. Sa période est probablement de l'ordre de 20 ans. Il forme la tête de la famille de même nom, mais on a des raisons pour le considérer comme un dérivé de l'uranium dans une branche latérale de transformation, dont le point de départ n'est pas encore fixé. Si l'on examine les possibilités à ce point de vue, on trouve pour l'actinium un poids atomique de 226 ou de 230.

Le mésothorium II est le corps intermédiaire entre le mésothorium I et le radiothorium; ses propriétés sont celles de l'actinium.

VII. *Groupe du polonium.* — Valence 6, colonne VI.

Radio-éléments: polonium, radium A, thorium A, actinium A, radium C', thorium C'.

Corps type: polonium, poids atomique supposé 210.

Le polonium est le premier des éléments radioactifs nouveaux qui ait été découvert, il représente un type chimique nouveau. Sa période est d'environ 140 jours, et l'on peut calculer que la quantité de polonium dans les minerais d'urane est environ 5000 fois plus petite que celle de radium. Aussi n'a-t-il pas encore été possible de déterminer le poids atomique du polonium; mais il a été possible de déterminer une raie assez forte de son spectre; cette raie disparaît en même temps que le polonium se détruit¹.

Le polonium est le dernier terme actif de l'évolution du radium et peut être facilement obtenu à partir du terme intermédiaire radium D ou radio-plomb. Le polonium se rapproche par ses propriétés du bismuth et du tellure, il a finalement été classé comme l'homologue de ce dernier.

Les trois corps A sont les premiers termes des dépôts actifs résultant de la transformation des émanations. Parmi ces corps, seul le radium A a pu être étudié, les deux autres ayant des périodes trop courtes. Les propriétés chimiques du radium A ont été attribuées par extension au thorium A et à l'actinium A.

Les corps C' sont les dérivés hypothétiques du radium C et du thorium C qui émettent des rayons α de très long parcours et doivent avoir, conformément à ce fait, une vie extrêmement brève. Un corps analogue existe probablement dans la série de l'actinium.

VIII. *Groupe du bismuth.* — Valence 5, colonne V.

Radio-éléments: radium E, radium C, thorium C, actinium C.

Corps type: bismuth (inactif), poids atomique 208.

Les radio-éléments de ce groupe n'apportent pas de type nouveau, et leur représentant chimique est un élément inactif, le bismuth, dont ils ont les propriétés.

Le radium E est le parent direct du polonium. Les corps C sont les termes des familles de radio-éléments qui subissent la transformation multiple, suivant deux modes différents. Ce fait a été établi pour le radium C et le thorium C et doit probablement exister pour l'actinium C.

IX. *Groupe du thallium.* — Valence 3, colonne III.

Radio-éléments: radium C'', thorium D, actinium D.

Corps type: thallium (inactif), poids atomique 204.

Les radio-éléments de ce groupe ont les propriétés du thallium. L'un d'eux, le radium C'', forme une branche très peu importante de la transformation double du radium C. Les deux autres sont les éléments correspondants

¹ Mme Curie et A. Debierne, *Comptes rendus*, 1910 [voir p. 375 — ed.].

dans les familles du thorium et de l'actinium (ce qui n'est pas indiqué, en ce cas, par la notation restée en usage depuis une époque où la nature de la transformation n'était pas bien connue).

Le thorium D correspond à la transformation de 35 pour 100 des atomes de thorium C, tandis que 65 pour 100 de ces atomes se transforment en thorium C'. L'actinium D correspond en apparence à la transformation de la totalité des atomes de l'actinium C.

X. *Groupe du plomb*. — Valence 4, colonne IV.

Radio-éléments: radium B, thorium B, actinium B et radium D.

Corps type: plomb, poids atomique 207,1.

Les radio-éléments de ce groupe ont les propriétés de l'élément inactif plomb et ne contiennent pas de type nouveau. Les trois premiers font partie des dépôts actifs à la suite des corps A, leurs périodes sont assez courtes. Le radium D, au contraire, qui dérive du radium B par l'intermédiaire du radium C et C', a une période de 16 ans environ et peut, pour cette raison, s'accumuler dans les minerais d'urane; on l'en extrait avec le plomb dont il n'a pu être séparé. Il constitue une source de polonium. On le nomme aussi *radioplomb*.

En dehors des corps indiqués, on doit prévoir la présence dans le groupe X de quelques autres éléments encore. Il s'agit des produits inactifs avec lesquels se terminent les séries des transformations radioactives.

Si l'on applique les règles exposées plus haut d'une part au polonium et au thorium C' qui émettent des rayons α , d'autre part au radium C'', au thorium D et à l'actinium D qui émettent des rayons β (et γ), on trouve que, dans tous les cas, les éléments obtenus lors de ces transformations appartiennent au groupe du plomb. S'il existe un actinium C' à rayons α , son dérivé serait également de ce groupe. De sorte que, pour chaque famille, les deux bifurcations amènent à des corps Z' et Z'' qui sont tous de la nature du plomb. Si l'on calcule les poids atomiques de ces corps, on trouve que dans la famille de l'actinium les termes Z' et Z'' ont le même poids atomique 210 ou 206 (suivant que celui de l'actinium est 230 ou 226); dans la famille du thorium, on trouve pour Z' et Z'' le poids atomique de 208; dans la famille de l'uranium, on trouve pour Z' un poids atomique de 206 et, pour Z'', 210. D'après une ancienne hypothèse de M. Rutherford, le polonium se transforme en plomb, et l'expérience, très difficile il est vrai, semble confirmer cette manière de voir. Mais le raisonnement qui précède montre que l'on peut prévoir non pas un, mais six corps de l'espèce plomb, de provenance analogue, se réduisant à deux ou à trois, si ceux de même poids atomique se confondent. M. Soddy et M. Fajans ont émis l'hypothèse que le plomb ordinaire est un mélange de corps Z de poids atomiques différents. Ils suggèrent aussi qu'il pourrait en être de même pour les autres éléments inactifs du système.

Ces deux savants ont édifié indépendamment des théories très semblables relatives aux groupes de corps de même espèce occupant la même place

dans le système, bien que leurs poids atomiques puissent différer de plusieurs unités. Se basant sur l'insuccès des tentatives réalisées jusqu'ici pour séparer les corps d'un groupe, ils posent en principe qu'une telle séparation est impossible et admettent que les éléments «non séparables» ont exactement les mêmes propriétés chimiques et le même spectre. Cette dernière conclusion résulte des examens du spectre de thorium à fort pourcentage d'ionium, où les lignes du thorium seules étaient observées.

On peut penser que de telles conclusions ne sont pas absolues et qu'il n'est pas très vraisemblable que des éléments du même groupe, mais de poids

Tableau I

| H 1,008 | O | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | | |
|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | He 3,99 | Li 6,94 | Be 9,1 | Bo 11,0 | C 12,00 | Az 14,01 | O 16,00 | F 19,0 | | | |
| | Ne 20,2 | Na 23,00 | Mg 24,32 | Al 27,1 | Si 28,3 | P 31,04 | S 32,07 | Cl 35,46 | | | |
| | A 39,88 | K 39,10 | Ca 40,07 | Sc 44,1 | Ti 48,1 | Va 51,0 | Cr 52,0 | Mn 54,93 | Fe 55,84 | Co 58,97 | Ni 58,68 |
| | | Cu 63,57 | Zn 65,37 | Ga 69,9 | Ge 72,5 | As 74,98 | Se 79,2 | Br 79,92 | | | |
| | Kr 82,92 | Rb 85,45 | Sr 87,63 | Yt 89,0 | Zr 90,6 | Nb 93,5 | Mo 96,0 | | Ru 101,7 | Rh 102,9 | Pd 106,7 |
| | | Ag 107,83 | Cd 112,40 | In 114,8 | Sn 119,0 | Sb 120,2 | Te 127,5 | I 126,92 | | | |
| | Xe 130,2 | Cs 132,81 | Ba 137,37 | La 139,0 | Ce 140,25 | Pr 140,3 | Nd 144,3 | Sa 150,4 | Eu 152,0 | Gd 157,3 | |
| | Zb 159,2 | Dy 162,5 | Er 167,7 | Tm 168,5 | Yb 172 | Lu 174 | Ta 181,5 | W 184,0 | | Os 190,9 | Pt 195,2 |
| | | Au 197,2 | Hg 200,6 | Tl 204,0 | Pb 207,1 | Bi 208,0 | Po 210? | | | | |
| | Em 222 | Ra 226 | | Ac 230,2 | Th 232,4 | UrX 234? | Ur 238,5 | | | | |

atomique différent, puissent avoir *identiquement* les mêmes propriétés et le même spectre. Si l'on considère que les deux corps isomorphes baryum et radium dont les poids atomiques sont pourtant très différents (137 et 206) ne se séparent que par des cristallisations nombreuses, on conçoit facilement que la séparation puisse être très difficile quand on a de très petites quantités de corps semblables ayant des poids atomiques très voisins. Mais il n'en résulte pas que cette séparation soit rigoureusement impossible, elle est peut-être seulement extrêmement difficile. On pourrait supposer de même que les spectres de deux éléments d'un même groupe ne diffèrent que par un faible déplacement des raies homologues¹.

¹ D'après des expériences récentes (Rutherford et Andrade), les spectres du radium B et du plomb semblent confondus, au moins dans la région de longueurs d'ondes qui correspond aux rayons Röntgen et à la précision des expériences.

Quoi qu'il en soit, les corps «non séparables» offrent un exemple curieux de groupes analogues à ceux qui existaient déjà dans le système (terres rares, groupes de la colonne VIII), mais présentant des liaisons bien plus étroites. Ils peuvent aussi recevoir une utilisation pratique en Chimie. Tout radio-élément peut servir comme indicateur d'une sensibilité extrême pour diverses opérations effectuées avec l'élément inactif dont il est «inséparable».

En dehors des corps Z il existe, comme on sait, un autre produit inactif des transformations radioactives. Ce produit est l'hélium qui résulte de toutes les émissions de rayons α . Ce gaz est produit régulièrement par le radium (en équilibre avec l'émanation et les dérivés de celle-ci), à raison de 160 mm³ par an et gramme de radium. Il est aussi produit par le polonium, et des expériences récentes ont montré que cette production, pour une quantité de polonium déterminée, est très exactement proportionnelle au nombre d'atomes transformés, calculé d'après la loi de destruction spontanée. Ces expériences prouvent, une fois de plus, combien le phénomène est sûr et digne de confiance.

On ne saurait évidemment affirmer que le schéma de classement des radio-éléments n'ait plus à subir de modifications; mais on est en droit de penser que les résultats essentiels dont il est l'expression resteront conservés.

Il nous reste à examiner les conséquences des nouvelles notions apportées par l'étude des radio-éléments, au point de vue de l'ensemble du système et au point de vue de la structure atomique.

L'introduction des radio-éléments dans le système est une preuve que des transformations du genre de celles que nous révèlent les phénomènes radioactifs sont la raison d'être et la base de ce système de signification jusqu'ici inaccessible. Ces transformations ont pu avoir lieu jadis, elles ont peut-être encore lieu dans des conditions où nous ne savons pas les observer. On constate que, dans la suite d'une transformation, un élément peut éprouver des déplacements qui le font passer par diverses colonnes, avec la possibilité de repasser plusieurs fois par la même, avec des propriétés analogues.

Nous savons encore fort peu de choses sur la structure des atomes. Les spéculations récentes à ce sujet ont plutôt encore un caractère de réflexions générales. Cependant quelques résultats peuvent être retenus.

Ainsi qu'il a déjà été fréquemment observé, la relation très particulière de l'hélium avec les radio-éléments nous conduit à admettre que l'atome d'hélium est un sous-atome dont sont formés les éléments. Nous sommes ainsi ramenés, sous une forme nouvelle, à l'ancienne hypothèse de Proust. Le rôle de l'hydrogène reste encore inconnu; il paraît cependant à peu près certain que si l'affirmation précédente est exacte pour l'hélium, elle doit l'être aussi pour l'hydrogène.

L'évolution des théories électromagnétiques a permis de prévoir que les écarts des poids atomiques de nombres entiers pourront être expliqués par

les échanges d'énergie interne, accompagnés de variation de masse, qui ont lieu lors de la formation d'atomes à partir de leurs constituants simples¹ (tels que l'hydrogène ou l'hélium). Si l'on ne tient pas compte de ces écarts, on constate que les poids des atomes légers sont fréquemment des multiples de 4; ces atomes pourraient donc être des groupements d'atomes d'hélium, tandis que les autres seraient formés avec le secours de l'hydrogène.

Tableau II

| | | |
|---|---|--|
| β UrY $\downarrow \alpha$ 6 du Th-UrX ₁ 25,6j " Th $\downarrow \beta$ UrX ₂ 12m " Ta $\downarrow \beta \gamma$ UrII 2,10 ^a " Ur $\downarrow \alpha$ Io 2,10 ^a ? " Th $\downarrow \alpha$ Ra 1750a " <u>Ra</u> $\downarrow \alpha \beta$ EmRa 3,85j " <u>EmRa</u> $\downarrow \alpha$ RaA 3,0m " Po $\downarrow \alpha$ RaB 26,7m " Pb $\downarrow \beta \gamma$ RaC 19,5m " Bi $\downarrow \alpha$ 14mRaC " RaC' 10 ^s ? " Po? 6 du Tl $\downarrow \alpha$ $\downarrow \beta$ RaD 16,5a " Pb ? $\downarrow \beta$ RaE 5,0j " Bi $\downarrow \beta \gamma$ Po 140j " <u>Po</u> $\downarrow \alpha$ Pb? | Thorium 3,10 ^a a " <u>Th</u> $\downarrow \alpha$ MthI 5,5a " Ra $\downarrow ?$ MthII 6,2h " Ac $\downarrow \beta \gamma$ Rth 2,02a " Th $\downarrow \alpha$ ThX 3,64j " Ra $\downarrow \alpha \beta$ EmTh 53sec " EmRa $\downarrow \alpha$ ThA 0,14sec " Po? $\downarrow \alpha$ ThB 10,6h " Pb $\downarrow \beta$ ThC 55m " Bi $\downarrow \alpha$ 3,1mThD ThC' 10 ^m sec? " Po 6 du Tl \downarrow $\beta \gamma$? ? | 6 du " <u>Ac</u> Ac ? RaAc 19,5j " Th $\downarrow \alpha \beta$ AcX 11,4j " Ra $\downarrow \alpha$ EmAc 3,9s " EmRa $\downarrow \alpha$ AcA 0,002s " Po? $\downarrow \alpha$ AcB 36,1m " Pb $\downarrow \beta$ AcC 2,15m " Bi $\downarrow \alpha$ 4,7mAcD ? 6 du Tl $\beta \gamma$? |
| Famille Uranium-Radium | Famille Thorium | Famille Actinium |

Des raisons très sérieuses nous obligent à admettre que les atomes contiennent des électrons qui font partie de leur constitution. M. J.-J. Thomson a été conduit à admettre que ces électrons sont disposés en anneaux autour d'un noyau central chargé positivement². M. Rutherford, se basant sur l'étude de la dispersion des rayons α , a conclu que ce noyau positif doit être de dimensions extrêmement restreintes, de sorte qu'il se présente presque comme une charge positive ponctuelle entourée à une certaine distance d'une distribution d'électrons, laquelle détermine ce que nous considérons comme le diamètre de l'atome³.

¹ Langevin, *Conférences de la Société de Physique*, 1913.

² J.-J. Thomson, *Phil. Mag.*, 1904.

³ Rutherford, *Phil. Mag.*, 1911.

D'autre part, me basant sur le caractère atomique des phénomènes radioactifs, j'ai, il y a plusieurs années déjà, insisté sur ce fait que l'on doit admettre dans les atomes la présence de deux espèces d'électrons: les électrons *périphériques*, qui interviennent dans les relations de l'atome avec l'extérieur et sont utilisés pour l'émission de rayonnement, pour la conduction électrique dans les métaux ou gaz ionisés et pour les échanges thermiques, et les électrons *essentiels* ayant une liaison beaucoup plus profonde et ne se manifestant que dans l'émission de rayons β^1 . La différence fondamentale entre les deux caté-

Tableau III

| 0 | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|-------------------|----------|----------------|--|--|--|-----------------------------------|-----|
| | | | Th.D β Z'' ²⁰⁸ Z' ²⁰⁸ | α Th.C $-\beta$ α | Th.C' $-\beta$ Th.A α | | |
| | | | Ra.C'' β Z'' ²¹⁰ Z'(Pb?208,5) | α Ra.D β α Ra.B β | Ra.E $-\beta$ α Ra.C α | Po Ra.C' Ra.A | |
| | | | Ac.D β Z'' ²¹⁰ ou 206 Z'? | α Ac.B $-\beta$ α | Ac.C $-\beta$ α | Ac.C'? Ac.A | |
| α - Em.Th. | α | Th.X M.Th.I | α M.Th.II α | Ra.Th. β Th. 232,4 Io. Ur.X | α β α | Ur.II β Ur.I 238,5 | |
| α - Em.Ra. | α | Ra. 226 | α | | | | |
| α - Em.Ac. | α | Ac.X | α 230 ou 226 Ac. | R.Ac. | | | |

gories consiste en ceci qu'un atome peut perdre un ou plusieurs électrons périphériques sans changer de nature, tandis que l'émission d'un rayon β entraîne la transformation de l'édifice atomique. Les électrons essentiels ne peuvent donc venir que du noyau. Cette même manière de voir a été exprimée plus récemment de divers côtés².

Nous avons donc à envisager un noyau central très petit, formé d'éléments d'électricité positive et d'électrons, et entouré à une certaine distance par un

¹ Mme Curie, *Réunion de Bruxelles*, 1911.

² Soddy, *Chimie des radio-éléments*, 1914. — N. Bohr, *Phil. Mag.*, mars 1913.

ou plusieurs anneaux d'électrons périphériques. Il semble raisonnable de supposer que c'est l'anneau extérieur qui intervient pour déterminer la valence. M. J.-J. Thomson suppose, par exemple, que la valence positive est représentée par le nombre des électrons de cet anneau, toujours inférieur à 8, tandis que la valence négative est le complément de ce nombre à 8¹.

On conçoit que l'on puisse expliquer ainsi le changement de valence dans les transformations radioactives. Quand un atome perd une particule α qui représente deux éléments de charge positive, cet atome, pour rester neutre au total, doit perdre, comme compensation, deux électrons périphériques, et sa valence positive diminue de deux unités. De même, quand un électron essentiel (rayon β) est émis par le noyau, l'atome s'adjoint un électron périphérique et sa valence positive augmente d'une unité. Il est vrai qu'on pourrait objecter contre ce raisonnement que, dans les transformations à rayons α , les atomes résultants ne sont pas neutres, mais ont une charge positive; l'expérience montre cependant que, dans un vide très parfait, la charge observée tend à disparaître; elle n'est donc pas due à un phénomène primordial, mais à des phénomènes qui suivent la transformation et se trouvent déterminés par la présence de gaz².

Je n'insisterai pas ici sur les difficultés que soulève la structure des atomes au point de vue de la loi exponentielle des transformations radioactives. Elles ont été traitées dans d'autres circonstances et M. Debiérne a fait à ce sujet une hypothèse de grand intérêt³. Je terminerai par la conclusion qui me semble résulter de tout ce qui précède.

La chimie des radio-éléments ou radio-chimie, jointe à l'étude des transformations radioactives, est la *science de la structure des atomes et de leurs relations génétiques*. Ainsi les radio-éléments nous ouvrent un monde jusqu'ici mystérieux; nous ne pouvons encore que l'entrevoir, mais il est légitime d'en prédire la révélation magnifique.

¹ J. - J. Thomson, *Réunion de Bruxelles*, 1913.

² Wertenstein, *Société scientifique de Varsovie*, 1915.

³ Debiérne, *Conférences de la Société de Physique*, 1913.