Introduction à la chimie nucléaire

Autor(en): **Haenny, Charles**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **61 (1940-1941)**

Heft 255

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-272988

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN DE LA SOCIETE VAUDOISE DES SCIENCES NATURELLES
Vol. 61 1941 No 255

Introduction à la chimie nucléaire

PAR

Charles HAENNY

(Séance du 15 janvier 1940.)

Résumé. — Le domaine de la chimie nucléaire est celui du noyau de l'atome. Les noyaux sont composés de protons et de neutrons, mais d'autres particules fondamentales interviennent fréquemment en chimie nucléaire: les électrons positif et négatif. Les noyaux radioactifs sont des noyaux qui ont conservé une instabilité qui disparaît généralement par l'émission d'une particule chargée. Les réactions nucléaires qui modifient la composition des noyaux sont produites par les neutrons lents ou rapides, par la radiation γ ou par les noyaux légers rapides: protons, deutons, hélions. Ainsi s'opèrent: transmutations et synthèses radioactives. — Les réactions nucléaires qui libèrent le plus d'énergie et qui, de plus, sont susceptibles de se produire à une grande échelle, sont les réactions de rupture où certains noyaux, parmi les plus lourds que l'on connaisse, se rompent à la suite de l'absorption d'un neutron. Le développement rapide de la chimie nucléaire, ainsi que ses applications, découlent des caractères particuliers à cette science. Il faut surtout citer la grande sensibilité et l'extrême finesse des méthodes expérimentales.

La chimie nucléaire est une science qui s'occupe du noyau de l'atome comme la chimie minérale et organique, étudie les atomes et les molécules. La chimie nucléaire traite de la composition des noyaux, de leur stabilité, des possibilités de combinaisons, ainsi que du mécanisme des réactions nucléaires.

La chimie nucléaire est si intimement liée à la physique nucléaire qu'il est difficile de concevoir un grand nombre de phénomènes nucléaires sans le concours des deux. C'est ainsi qu'il sera parfois question, pour la compréhension de la chimie nucléaire, de quelques phénomènes qui ne relèvent, en bonne logique, que du domaine de la physique nucléaire.

L'importance capitale du noyau pour l'atome et par suite pour la structure de la matière est bien connue. C'est, en effet, le noyau qui constitue la partie essentielle de la masse de l'atome, c'est lui qui détermine la structure électronique de l'atome et qui fixe, en conséquence, les propriétés chimiques des éléments de la chimie classique.

Le noyau est à la fois une quantité de matière et une quantité d'électricité positive, toutes deux gigantesques par rapport au volume si petit qu'il occupe (environ un millier de milliards de fois plus petit que celui de l'atome). Le noyau est donc de la matière et de l'électricité positive à un état de condensation extrême, tel qu'on n'en trouve nulle part ailleurs.

De si grandes densités en masse et en électricité donnent lieu à des champs de forces considérables, d'un ordre de grandeur bien supérieur à ceux que l'on connaît habituellement. Les énergies développées dans ces conditions sont couramment de plusieurs millions de fois plus grandes que celles que l'on rencontre en chimie classique.

Il faut, pour passer du domaine de la chimie classique à celui de la chimie nucléaire, opérer des changements d'échelles si considérables, que les phénomènes ne sont pas seulement modifiés quantitativement, mais leur nature même apparaît changée. C'est ainsi que dans le noyau, ou à son voisinage immédiat, la matière peut disparaître, comme s'évanouir, et se transformer en énergie (cinétique, électromagnétique, par exemple), ou inversement, illustrant fréquemment l'équivalence de ces deux formes, matière et énergie, simplement liées par un facteur de transformation. La matière se présente alors à nous comme de l'énergie très concentrée et l'énergie comme de la matière à un grand degré de dilution.

Il n'y a guère que vingt ans que le noyau est devenu accessible à l'expérimentation. Depuis lors, et tout particulièrement pendant ces dix dernières années, les moyens d'atteindre le noyau et de pénétrer dans l'enceinte nucléaire se sont multipliés et développés. Le noyau est actuellement devenu tout un monde nouveau ouvert à notre investigation. Les découvertes qui s'y font sont riches en conséquences pour les disciplines les plus diverses.

La composition des noyaux.

La composition des noyaux est simple puisqu'ils n'apparaissent tous formés que de deux constituants: le proton et le neutron.

Le PROTON est le noyau de l'atome d'hydrogène. Celui-ci étant le plus léger des atomes, son noyau est aussi le plus

léger des noyaux. La masse du proton est, à très peu de chose près, égale à une unité de l'échelle conventionnelle des poids atomiques. Le proton est chargé d'une quantité d'électricité positive, égale et de signe inverse à celle de l'électron ordinaire ou électron négatif. La charge du proton sera de + 1 si celle de l'électron est de — 1.

Le proton n'est pas autre chose que l'ion hydrogène, c'est-à-dire l'atome d'hydrogène qui a perdu son électron périphérique par ionisation. On sait que le proton ou ion hydrogène, qui n'existe pas à l'état libre, présente une certaine stabilité dans nombre de milieux tels que les solutions d'électrolytes acides.

Le NEUTRON [1] est un grain de matière aussi petit que le proton et très légèrement plus lourd que ce dernier, mais il n'a pas de charge électrique, il est neutre. Le neutron ne peut, en aucun cas, retenir des électrons à sa périphérie comme le font les noyaux dans les atomes. Il est, quant à sa masse, une espèce de noyau, mais un noyau qui reste constamment nu, qui n'a, ni ne subit, aucune action électrique [2].

Les neutrons libres sont rares par rapport au nombre des atomes et des molécules. Ils n'existent guère dans la nature ailleurs que dans le rayonnement venu des espaces interstellaires que reçoit constamment notre planète, et qu'on appelle le rayonnement cosmique. Cette radiation, formée de plusieurs espèces de particules chargées d'électricité positive ou négative et de lumière aux ondes extrêmement courtes, contient également des neutrons plus ou moins rapides.

Les neutrons peuvent être comparés à un gaz particulièrement subtil, qui ne peut être contenu dans aucune enveloppe. Ils fuient, en effet, au travers de tous les récipients et se comportent presque comme si les murs (même en plomb) qu'on leur oppose, n'existaient pas.

Les protons et les neutrons représentent à eux deux les seuls éléments de cette nouvelle chimie qu'est la chimie nucléaire. Les noyaux qu'ils forment en se combinant sont donc des composés binaires. Les centaines d'espèces de noyaux que l'on connaît impliquent pour ces deux éléments une richesse de possibilité de combinaison particulièrement grande. Encore qu'exceptionnelle, cette propriété n'a rien, *a priori*, d'étonnant

[1] Le neutron a été découvert par les travaux de Bothe et Becker, *Z. Phys.*, 1930. **66,** 289. — I. Curie et F. Joliot, *C. R.*, 1932, **194,** 273, 708, 876. — Chadwick, *Proc. Roy. Soc.*, 1932, **136,** 692.

[2] Le neutron est pourtant influencé par le champ magnétique, F. Bloch, *Phys. Rev.*, 1936, **50,** 259, a été le premier à signaler cette curieuse et importante propriété.

puisque les chimistes savent combien sont nombreux les composés que peuvent donner, par exemple, les deux seuls éléments chimiques: le carbone et l'hydrogène.

Toutefois, contrairement à ce que l'on connaît en chimie classique, la composition des noyaux ne correspond à aucune formule générale de combinaison. Tout ce que l'on peut dire de simple est que les neutrons sont dans le noyau en nombre égal ou supérieur à celui des protons (le noyau d'hydrogène constitué d'un seul proton mis à part) et que le rapport du nombre des neutrons à celui des protons ne peut varier pour un élément chimique donné qu'entre d'étroites limites qui définissent le domaine de stabilité de ses isotopes. Ce rapport croît lentement à mesure que grandit le poids atomique. Il est, par exemple, de 1 pour l'hélium (2 neutrons + 2 protons) et atteint 1,6 pour l'uranium (146 neutrons + 92 protons).

Un nombre quelconque de protons Z (plus petit que 92) peut donner lieu à un petit nombre de combinaisons nucléaires stables avec N ou N + 1, N + 2, etc., neutrons. Tous ces noyaux qui ont le même nombre de protons, sont porteurs de la même charge électrique positive Z. Ils forment tous des atomes neutres de poids différents, mais avec le même nombre Z d'électrons périphériques; ils appartiennent par suite au même élément chimique. Ces atomes sont isotopes et l'on dit également de leurs noyaux qu'ils sont isotopes.

Le nombre Z s'identifie avec le *numéro atomique*. Le nombre total des particules d'un noyau (protons + neutrons) représente en gros le poids du noyau en unité du poids atomique puisque chaque particule vaut une unité dans cette échelle. On l'appelle le *nombre de masse* M.

Un noyau est défini et caractérisé avec précision par ces deux nombres: Z et M. En pratique, pour plus de commodité, on désigne tout de même les noyaux en faisant usage des symboles chimiques habituels auxquels on adjoint, en indices, les valeurs de Z et de M de la manière suivante:

$$^{M}_{Z}X$$

où X figure un symbole chimique.

On écrira par exemple:

pour le noyau d'hydrogène ou proton:	$^{1}_{1}H$
» » » » lourd (deutérium) ou deuton	$^{2}_{1}H$
» » de l'isotope 3 de l'hydrogène:	$^{3}_{1}H$
» » d'hélium ou hélion:	$^{4}_{2}He$

pour le noyau de l'isotope 6 du lithium:	${}^{6}_{3}Li$
» » » » 7 du lithium:	${}^{7}_{3}Li$
. . . . .	
» » » » 35 du chlore:	${}^{35}_{17}Cl$
» » » » 37 du chlore:	${}^{37}_{17}Cl$
. . . . .	
» » » » 234 de l'uranium:	${}^{234}_{92}U$
» » » » 235 de l'uranium:	${}^{235}_{92}U$
» » » » 238 de l'uranium:	${}^{238}_{92}U$

On désigne le neutron par ${}^{1}_{0}n$ puisqu'il n'a pas de charge et une masse dont la valeur numérique entière est égale à une unité de l'échelle des poids atomiques.

A part les neutrons et les protons qui représentent les éléments permanents de la chimie nucléaire, il existe un certain nombre de particules de petites masses qui peuvent être créées (ou éventuellement disparaître) au cours des réactions nucléaires aux dépens (ou au profit) de la masse des noyaux en réaction ou de l'énergie disponible. C'est le cas de l'électron positif ou positon et de l'électron négatif (ou négaton). Au repos, leur masse vaut $^{1}/_{1850}{}^{e}$ de celle du proton. Leur nombre de masse ou valeur entière du poids dans l'échelle atomique sera donc de zéro. On peut leur attribuer les symboles suivants: e^{+} pour le positon et e^{-} pour l'électron négatif.

Ces deux espèces d'électrons ne diffèrent, en principe, que par le signe de leur charge électrique. Mais, alors que l'électron négatif est très répandu, l'électron positif est très rare [1], les deux espèces ne se trouvent pas dans des conditions d'existence symétriques. La vie du positon est généralement brève. En effet, le positon et un électron négatif peuvent se détruire lorsqu'ils se rencontrent. La masse, ainsi que l'énergie cinétique de cette paire d'électrons, se transforment en énergie électromagnétique, c'est-à-dire, dans ce cas, en rayonnement gamma. C'est une annihilation de la matière. L'opération inverse ou création d'une paire d'électrons à partir du rayonnement gamma a également lieu, par exemple, dans le champ du noyau; c'est une matérialisation de l'énergie. Les positons sont émis par de nombreux corps radioactifs, préparés au laboratoire. Ils constituent alors le rayonnement β

[1] L'électron positif a été découvert dans le rayonnement cosmique, en 1933, aux Etats-Unis par Anderson (*Phys. Rev.*, 1933, **43,** 491), en Angleterre par Blackett et Occhialini (*Proc. Roy. Soc.*, 1933, **139,** 699).

positif. D'autres corps radioactifs émettent des électrons négatifs qui forment la radiation β négative.

Les combinaisons nucléaires ou noyaux n'ont pas une structure comparable à celle des molécules. Les noyaux ont tous la même forme ou à peu de chose près. Ils sont sphériques à l'exception des noyaux très lourds qu'il faut plutôt considérer comme des ellipsoïdes. Les protons et les neutrons sont groupés dans le noyau d'une manière qui rappelle le groupement des molécules dans la goutte d'un liquide. C'est le modèle nucléaire de la goutte. Il faut admettre, en conséquence, que les forces entre neutrons et protons ne sont pas des forces dirigées comme celles de la valence chimique. Dans le noyau, les places des neutrons et des protons n'étant pas définies, ceux-ci se mouvant constamment, il en résulte un équilibre des forces dont la répartition est toujours changeante. Pour le noyau, comme pour la goutte, on pourra parler de tension superficielle ou de température interne, ce qui exprime dans ce dernier cas, que les particules nucléaires dans les noyaux, comme les molécules dans les liquides, peuvent être animées de mouvements plus ou moins rapides suivant les conditions réalisées dans les milieux considérés.

Les noyaux radioactifs.

La propriété la plus extraordinaire que puissent présenter les noyaux et qui n'a nulle part son équivalent, est bien celle d'émettre des rayonnements de différentes espèces, ce que l'on appelle la radioactivité. Cette désintégration où le noyau rayonne un petit fragment de sa matière, illustre particulièrement bien la profonde différence qui sépare les phénomènes nucléaires des phénomènes atomiques ou moléculaires. Cette propriété est naturelle à quelques espèces nucléaires (de préférence aux noyaux lourds). Elle peut aussi appartenir à des noyaux synthétiques formés au laboratoire à la suite de réactions nucléaires. La radioactivité artificiellement produite s'appelle la *radioactivité provoquée*. Les éléments chimiques radioactifs ainsi obtenus sont dits des *radio-éléments* de synthèse.

La radioactivité résulte d'une instabilité nucléaire. Il y a déséquilibre entre les deux constituants du noyau. Les noyaux radioactifs sont des combinaisons non saturées en neutrons ou en protons.

Les noyaux qui ne sont pas saturés en neutrons possèdent une *radioactivité électronique positive*. L'équilibre nucléaire

se rétablit lors de la désintégration, par une espèce de conversion interne au noyau. L'un des protons nucléaires se transforme en un neutron. Ce proton perd sa charge en même temps qu'un positon est violemment expulsé de l'enceinte nucléaire formant le rayonnement β positif. La masse du proton étant très voisine de celle du neutron, le noyau conserve presque le même poids au cours de cette réaction.

La charge positive du noyau diminue ainsi d'une unité, la nouvelle enveloppe électronique comporte un électron négatif de moins par rapport à celle de l'atome initial et le numéro atomique est plus petit d'une unité. Il y a eu transmutation par désintégration radioactive.

La désintégration radioactive est une réaction nucléaire de premier ordre (réaction qui se produit à partir d'une combinaison unique). Elle est décrite par l'équation nucléaire suivante où l'astérisque désigne le noyau radioactif:

$$^{M}_{Z}X^{*} = {}_{Z-1}^{M}Y + e^{+}$$

L'équation d'une réaction nucléaire ne se rapporte jamais qu'au noyau et l'on y fait abstraction des transformations qui intéressent les couches électroniques extérieures. C'est ainsi que l'on ne fait pas mention de l'électron périphérique en moins dans le nouvel atome neutre.

Les noyaux qui ne sont pas saturés en protons présentent une *radioactivité électronique négative*. Elle se manifeste par une conversion interne en quelque sorte inverse de la précédente puisque c'est un neutron cette fois qui se transforme dans l'enceinte même du noyau, en un proton avec la projection à l'extérieur d'un électron négatif, constituant du rayonnement β négatif.

Cette désintégration radioactive s'exprime par l'équation nucléaire suivante:

$$^{M'}_{Z'}R^{*} = {}_{Z'+1}^{M'}T + e^{-}$$

Dans les deux équations précédentes, le nombre de masse et la somme algébrique des charges électriques n'ont pas été modifiés par la réaction. Le noyau a gagné une charge positive correspondant à la charge négative de l'électron expulsé, il n'y a pas création de quantité d'électricité.

Le nouvel atome dont le noyau possède une charge positive de plus que l'ancien, aura également une enveloppe électronique nouvelle, plus riche d'un électron négatif assurant de cette manière la neutralité électrique de l'atome stable.

Il faut faire remarquer que la radioactivité β naturelle est

toujours négative. L'électron positif serait connu depuis longtemps s'il était émis même par un seul corps naturellement radioactif. Par contre, la radioactivité α, où il y a émission d'hélions, n'est connue jusqu'ici, qu'en radioactivité naturelle.

Il est quelques cas de radioactivité électronique positive où l'émission d'un électron positif est remplacée par l'absorption d'un électron négatif par le noyau radioactif. Cet électron provient de la couche électronique K de l'atome, la plus voisine du noyau. En se précipitant sur le noyau, il neutralise la charge positive d'un proton nucléaire qui peut dès lors devenir un neutron. La radioactivité disparaît ainsi sans émission de rayonnement corpusculaire. L'enveloppe électronique qui est profondément perturbée émet, en se réorganisant, un rayonnement électro-magnétique (lumineux) qui est une radiation X. C'est la radioactivité par *capture de l'électron* K.

Il est à peine nécessaire de rappeler que la désintégration radioactive se fait en suivant les lois du hasard et que l'âge d'un atome qui se désintègre ne permet pas de prévoir le moment de la désintégration d'un autre noyau pourtant de même espèce.

On peut répéter à ce propos pour la radioactivité provoquée ce que l'on dit au sujet de la radioactivité naturelle. On compare la durée des atomes radioactifs à la vie d'un animal et l'on peut, pour chaque espèce, calculer la durée de vie moyenne. En radioactivité, on se réfère le plus souvent à une grandeur équivalente qu'on appelle la *période*. C'est le temps qui doit s'écouler pour que la moitié des noyaux radioactifs se soit désintégrée. On réalise facilement qu'au bout du temps d'une période, l'intensité du rayonnement radioactif d'un corps soustrait à toute cause qui peut faire naître des noyaux radioactifs, aura diminué de moitié.

Quelques réactions nucléaires produites par les neutrons.

Les réactions nucléaires les plus simples sont celles réalisées à l'aide des neutrons. Nous les décrirons brièvement en premier lieu, ne considérant encore ici que les types de réactions les plus caractéristiques.

Le neutron qui passe si facilement au travers de tous les corps, si denses soient-ils, ne le fait que parce que les noyaux des atomes n'occupent qu'une place infime, presque négligeable, du volume des atomes ou molécules. Les chocs entre neutrons et noyaux sont donc très *rares,* mais ils existent et le

neutron peut rencontrer un noyau. C'est le seul obstacle qu'il puisse trouver sur son passage.

Le choc du neutron sur le noyau peut être élastique comme celui de deux billes qui se heurtent. Contre un noyau très lourd, le neutron ne perd guère de vitesse, il est simplement réfléchi. Si, au contraire, le noyau heurté est léger, de l'hydrogène par exemple, l'énergie perdue par le neutron à l'occasion d'un choc élastique peut être grande et atteindre la moitié de son énergie cinétique. C'est la raison pour laquelle on utilise l'hydrogène de l'eau ou encore plus souvent de la paraffine pour ralentir les neutrons qui sont toujours produits à l'état de neutrons rapides. En subissant des chocs successifs, le neutron rapide, dont la vitesse était voisine de celle de la lumière, se ralentit peu à peu, jusqu'à ne plus avoir que la vitesse thermique que lui confère l'agitation des molécules, et par suite des noyaux, à la température d'expérience. Ces neutrons très lents sont désignés par le terme de *neutrons thermiques*.

Le choc d'un neutron contre un noyau peut enrichir l'énergie interne de celui-ci. Le choc est dit inélastique.

Mais le choc d'un neutron avec un noyau peut aussi lui être néfaste et le neutron peut disparaître, absorbé par le noyau. Il y a *capture du neutron* [1].

La capture ne suit d'ailleurs pas toujours une véritable collision, le neutron peut être attiré par le noyau et tomber sur lui un peu comme une pierre tombe dans le champ terrestre.

Par la capture d'un neutron, le poids du noyau est accru d'une unité. Le nouveau noyau, de même charge électrique que l'ancien, est son isotope.

Un neutron peut être capturé par un proton pour donner un deuton qui est la combinaison nucléaire la plus simple. Après s'être adjoint un électron périphérique, le deuton devient du deutérium ou hydrogène lourd, isotope stable de l'hydrogène:

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} = {}^{2}_{1}\mathrm{H} + 1 \text{ photon } \gamma \, . $$

Cette réaction, se produisant avec un neutron lent, est exoénergétique. L'énergie libérée est émise sous la forme de lumière nucléaire. Elle est naturellement invisible puisque sa

[1] FERMI : *Ricerca Scient.*, 1934, **1**, 283 et une série de mémoires publiés par FERMI et son école, dans le même périodique.

longueur d'onde est plus petite que celle des rayons X; c'est le *rayonnement* γ. Il est composé de grains de lumière ou photons dont l'énergie est plusieurs millions de fois celle des photons de la lumière visible.

Ainsi, en chimie nucléaire, comme en chimie classique, tous les chocs ne sont pas utiles à la réaction, un neutron qui heurte un proton n'est pas nécessairement capturé, il peut aussi être réfléchi à la suite d'un choc élastique. Il faut considérer, d'une manière générale, que la réaction nucléaire ne se produit qu'après un certain nombre de chocs, dont le dernier seul est efficace pour la réaction.

Remarquons, à propos de cette réaction nucléaire, que la réaction ne modifie en aucun cas le nombre de masse total du système, ni la somme algébrique des charges électriques. D'où la règle pratique suivante: la somme des indices supérieurs et la somme des indices inférieurs (e^- compté comme ayant un indice inférieur de -1 et e^+ de $+1$) sont constantes.

L'isotope produit par la capture d'un neutron peut appartenir à une espèce instable. Le nouveau noyau contenant trop de neutrons par rapport au nombre de ses protons, présentera alors une radioactivité électronique négative.

Exemple:

$$^{23}_{11}\mathrm{Na} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}\ \text{lent} = {}^{24}_{11}\mathrm{Na}^* + \text{rayonnement}\ \gamma\ .$$

La période du radio-sodium 24 est de 14,8 heures. Ainsi, si, à un moment donné, on a un million d'atomes de radio-sodium, il n'en restera plus que 500 000 au bout de 14,8 heures, 250 000 après 29,6 heures, etc. Les autres s'étant transformés en un élément nouveau: le magnésium 24. La transmutation s'est opérée de la manière suivante:

$$^{24}_{11}\mathrm{Na}^* = {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + \mathrm{e}^-$$

Comme c'est le cas ici, le rayonnement γ est généralement émis dans un temps très court (par exemple de 10^{-8} secondes) après la formation du nouveau noyau. Mais pour d'autres types de réactions assez rares, l'émission γ peut tarder plus ou moins, ou encore ne pas avoir lieu du tout. Il se forme alors deux espèces de noyaux de même composition, ceux qui ont gardé l'énergie du rayonnement γ sont dans un état métastable. Les deux espèces nucléaires présentent alors des

radioactivités de périodes différentes. Ce sont des *noyaux isomères* [1].

L'isomérie nucléaire est exceptionnelle. On observe, au contraire, en général, que les noyaux de même numéro atomique et de même nombre de masse, et par suite de même composition, sont identiques, quel que soit le type de réaction dans lequel ils ont pris naissance.

On peut considérer, d'une façon toute générale, que les neutrons entrent facilement dans l'enceinte nucléaire, et qu'ils en sortent sans difficultés particulières.

Renonçant à la représentation sphérique qui est celle qui convient réellement pour les noyaux, NIELS BOHR [2] a donné pour représenter l'état des neutrons dans le noyau, le modèle simplifié d'une cuvette remplie de billes.

S'il arrive une bille au bord de la cuvette, elle tombe facilement à l'intérieur et y reste sans en chasser d'autres pour autant qu'il y trouve de la place. C'est l'illustration du phénomène de capture du neutron lent.

Si la bille incidente est rapide, elle peut entrer et sortir de la cuvette. Elle heurte au passage les billes de l'enceinte, abandonnant ainsi une partie de son énergie cinétique dans la cuvette. Les billes de la cuvette sont dès lors animées de mouvements plus ou moins rapides et il se peut qu'au hasard des chocs une bille acquière une vitesse suffisante pour sortir, emmenant avec elle une partie de l'énergie provenant de la bille rapide incidente.

Cette dernière image explique comment un neutron rapide peut chasser un (ou même plusieurs pour un seul neutron rapide incident) neutron de l'enceinte nucléaire.

Exemple:

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n \text{ rapide} = ^{11}_{6}C^{*} + 2^{1}_{0}n \qquad \text{(neutron incident} + \text{neutron nucléaire.)}$$

Le noyau du carbone qui a été trop appauvri en neutrons n'est plus saturé, il est instable et présente la radioactivité

[1] Exemple : le brome radioactif $^{80}_{35}Br^{*}$ peut être préparé de la manière suivante :

$$^{79}_{35}Br + ^{1}_{0}n = ^{80}_{35}Br^{*} \quad \text{Périodes : 18 minutes et 4,2 heures.}$$

La radioactivité de ce produit décroît en mettant en évidence l'existence de deux périodes. Celle de 18 minutes correspond aux noyaux qui n'ont plus de rayonnement γ à émettre, l'autre de 4,2 heures provient des noyaux de brome qui ont conservé l'énergie d'une radiation γ non émise.

[2] Congrès du Palais de la Découverte, Paris 1937.

électronique positive qui caractérise cet état d'instabilité comme on l'a vu plus haut.

$$^{11}_{6}C^* = ^{11}_{5}B + e^+$$

La période du radio-carbone 11 est de 21,3 minutes.

Bien que les neutrons soient le réactif par excellence de la chimie nucléaire, on réalise un grand nombre de réactions par d'autres moyens.

Réactions photo-nucléaires.

Après les réactions produites par les neutrons, ce sont les réactions photo-nucléaires qui, de prime abord, sont les plus simples.

Au lieu d'être apportée par un neutron rapide, l'énergie nécessaire à l'évasion d'un neutron, peut être introduite dans le noyau par la lumière nucléaire. En effet, la lumière γ émise par un noyau peut être absorbée par un autre et produire suivant le cas, une photo-décomposition nucléaire comparable à une photo-décomposition moléculaire telle que celles que l'on connaît en photochimie. Cette manière d'expulser un neutron de l'enceinte du noyau est souvent appelée l'*effet photo-nucléaire* ou l'effet photoneutronique [1].

Exemple:

La photo-décomposition du deuton est la réaction inverse de celle que nous avons vue plus haut.

$$^{2}_{1}H + 1 \text{ photon } \gamma = ^{1}_{1}H + ^{1}_{0}n$$

Photo-décomposition de l'oxygène :

$$^{16}_{8}O + 1 \text{ photon } \gamma = ^{15}_{8}O^* + ^{1}_{0}n$$

La période du radio-oxygène 15 est de 2 minutes. C'est une radioactivité électronique positive puisqu'elle résulte d'un défaut de neutrons dans le noyau.

$$^{15}_{8}O^* = ^{15}_{7}N + e^+$$

L'azote 15 qui se forme est isotope stable présent en petite quantité dans l'azote naturel.

[1] Chadwick et Goldhaber, *Proc. Roy. Soc.*, 1935, **151**, 479.

Les réactions entre noyaux.

Les réactions photo-nucléaires permettent l'obtention de neutrons, mais ce n'est pas le mode de préparation le plus employé. Les neutrons ont été découverts et sont généralement produits par des réactions nucléaires entre des noyaux chargés. Bien que plus difficiles à réaliser, les réactions entre noyaux furent connues les premières, grâce à Rutherford, en 1919 [1].

La plupart des atomes ne perdent toute leur enveloppe électronique que lorsqu'on leur communique une vitesse voisine de celle de la lumière. Le noyau subsiste nu pour autant qu'il reste rapide. Il s'habille d'électrons à mesure qu'il se ralentit et redevient atome.

Un noyau rapide peut facilement traverser, à la manière d'un projectile, les enveloppes électroniques des atomes qu'il rencontre, mais il éprouve au voisinage du noyau des forces de répulsion particulièrement grandes qui risquent de l'éloigner. Cette répulsion est d'autant plus violente que les noyaux en présence sont plus lourds et davantage chargés d'électricité. C'est pour cette raison que seuls les noyaux des atomes légers sont actuellement utilisés comme projectiles.

Ce sont: le proton, le deuton, l'hélion.

La pénétration de ces projectiles chargés dans l'enceinte du noyau est toute une longue histoire.

Le noyau ne présente pas, vis-à-vis des projectiles chargés, la même physionomie que pour les neutrons. Il se modifie en effet suivant la nature du projectile qu'il reçoit et adapte avec souplesse sa défense au bombardement dont il est l'objet.

Pour réaliser une réaction nucléaire, un projectile doit, tout d'abord, arriver de plein fouet sur le noyau. Il peut alors y pénétrer de deux manières:

1° Par force, en passant au travers du barrage qui constitue ce qu'on appelle la « *barrière de potentiel* ».

2° Ou à la faveur des points faibles qui apparaissent dans cette barrière, en conséquence d'effets de résonance entre le noyau bombardé et le projectile.

Le noyau est une sphère qui apparaît à l'approche du projectile chargé, plus ou moins grossie et durcie suivant le nombre des charges électriques en présence. Mais renonçant à nou-

[1] Rutherford, *Phil. Mag.*, 1919, **37,** 581.
Blackett (*Proc. Roy. Soc* , 1925, **107,** 349) a pu observer la réaction à la réaction à la chambre à détente de Wilson.

veau à la forme réelle qui est sphérique, et reprenant le modèle inauguré par Bohr, il est possible de représenter la barrière de potentiel d'une manière très simple pour rendre compte, par une analogie mécanique, des phénomènes nucléaires observés.

La cuvette remplie des particules nucléaires s'entoure d'une espèce de barrage à l'approche des projectiles chargés. Les projectiles rapides peuvent l'escalader et le franchir. Les projectiles plus lents se heurteront à lui pour être refoulés à moins qu'ils n'arrivent en face des trous ou tunnels qui représentent les cas de pénétration par résonance.

Un projectile qui a pénétré dans le noyau peut réagir avec lui.

Quatre cas sont à considérer:

1° Capture simple,

Exemples: $^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{1}_{1}\mathrm{H} = ^{28}_{14}\mathrm{Si} + \text{rayonnement } \gamma$

$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{1}_{0}\mathrm{n}\ (\text{lent}) = ^{28}_{13}\mathrm{Al}^* + \text{rayonnement } \gamma\,.$

2° Réaction d'échange (un proton incident provoque le départ d'un neutron ou inversement),

Exemple: $^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{1}_{0}\mathrm{n}\ (\text{rapide}) = ^{27}_{12}\mathrm{Mg}^* + ^{1}_{1}\mathrm{H}$

3° Emission d'une particule plus légère que le projectile (intégration massive du noyau d'où accroissement du nombre de masse),

Exemples: $^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} = ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$

$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} = ^{30}_{15}\mathrm{P}^*$(1) $+ ^{1}_{0}\mathrm{n}$

4° Emission d'une particule plus lourde que le projectile (désintégration massive du noyau, diminution du nombre de masse).

Exemple: $^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{1}_{0}\mathrm{n} = ^{24}_{11}\mathrm{Na}^* + ^{4}_{2}\mathrm{He}$

S'il y a émission de neutrons, ceux-ci sortent de l'enceinte nucléaire avec la même facilité qu'ils peuvent y entrer. L'émission de particules chargées se fait, par contre, suivant les mêmes mécanismes que ceux que nous avons signalés pour la pénétration des projectiles chargés. Elles doivent, pour sortir,

[1] Premier radio-élément de synthèse connu, trouvé par F. et I. Joliot-Curie (*C. R.*, 1934, **198,** 254, 559), découverte de la radioactivité produite artificiellement.

franchir en sens inverse la même barrière de potentiel ou emprunter les tunnels qui la traversent en quelques points [1].

L'émission de particules chargées peut avoir lieu non seulement après capture d'un projectile chargé, mais elle peut aussi se produire à la suite de la capture d'un neutron.

Ces diverses réactions pourront donner des noyaux stables ou des noyaux radioactifs, émetteurs d'électrons positifs ou d'électrons négatifs suivant les mécanismes déjà vus.

Contrairement à ce qui se passe pour le neutron qui finit toujours par disparaître dans une réaction nucléaire, le projectile chargé perd, en se ralentissant, toute possibilité de réagir. Et l'on comprend que le rendement des réactions provoquées par les projectiles chargés soit toujours très faible.

Réactions de rupture.

Il ressort des quelque 700 réactions nucléaires connues du genre de celles que nous venons de décrire rapidement, parmi lesquelles on ne trouve pas de capture simple de l'hélion, que la composition des noyaux ne peut jamais être altérée qu'entre les étroites limites de + 3 et — 3 unités de l'échelle des poids atomiques. Les réactions de rupture sont toutes différentes.

Ces réactions n'ont pas le même caractère de généralité que les précédentes. Elles ne se produisent qu'avec quelques noyaux très lourds qui appartiennent aux éléments chimiques de la fin de la classification périodique de Mendéléieff. Elles sont aussi plus récentes; il n'y a guère que deux ans [2] que l'on sait que les noyaux d'uranium, de thorium, par exemple, se brisent après capture d'un neutron, en deux morceaux de grosseurs à peu près égales. Il y a rupture ou scission ou encore partition de ces noyaux.

Les transformations nucléaires apportées par ces réactions ne sont plus légères; on ne peut, au contraire, les imaginer plus profondes.

La coupure du noyau d'uranium (la plus étudiée et aussi la plus intéressante) ne se produit pas toujours d'une manière identique même quand il ne s'agit que d'un seul isotope. L'on trouve dans les produits de cette décomposition nucléaire du lanthane, du rubidium, du brome, du xénon, du césium, du

[1] Ceci s'applique également à la radioactivité naturelle α. L'existence de ces tunnels explique par exemple les parcours définis des particules α émises.

[2] C'est au début de 1939 que Hahn et Strassmann (*Naturwiss.* 1939, **27**, 11), poursuivant la voie ouverte par Mme I. Joliot-Curie, ont formulé l'audacieuse hypothèse de la rupture du noyau d'uranium.

strontium, du baryum, du molybdène, de l'antimoine, du tellure, de l'iode, etc., qui sont tous radioactifs.

Cette réaction est accompagnée de l'émission de plusieurs neutrons. Le rapport nucléaire $\frac{\text{neutrons}}{\text{protons}}$ doit, en effet, être plus petit pour les nouveaux noyaux que pour l'ancien, puisque l'on sait (p. 276) que ce rapport croît quand le poids atomique s'élève.

Tous les neutrons en excès dans les morceaux de l'uranium ne sont pas expulsés immédiatement (ou dans un temps très court), les derniers qui restent en trop dans l'enceinte nucléaire causent l'instabilité dont il a déjà été question plusieurs fois comme créant la radioactivité électronique négative. Cette instabilité, qui provient d'un bouleversement si profond, est grande et peut donner naissance à plusieurs radioactivités successives: un seul noyau est alors capable d'émettre plusieurs fois un électron négatif, à des moments différents. Ces radioactivités sont caractérisées par des périodes différentes. Le noyau formé par rupture est alors la tête d'une courte série radioactive, comparable à ce que l'on connaît en radioactivité naturelle.

La réaction de rupture de l'uranium est très fortement exoénergétique et l'énergie libérée est de quelque cinquante fois celle que l'on rencontre usuellement en chimie nucléaire.

Cette réaction nucléaire de rupture a fait apparaître de nouvelles possibilités.

La réaction produite par un neutron, dégage elle-même plusieurs neutrons. Il y a gain de neutrons libres et l'on peut imaginer ainsi une multiplication des neutrons. Une faible source peut devenir par l'usage de l'uranium, une source plus importante et très précieuse.

On peut aller plus loin et faire produire de nouvelles ruptures nucléaires aux neutrons déjà créés par rupture. Il suffit de mettre de l'uranium sur le chemin de ceux-ci. On peut développer de véritables chaînes de réactions à condition de disposer de quantités suffisantes d'uranium (le parcours du neutron avant de réagir étant de plusieurs centimètres). Le facteur d'amplification est assez grand pour qu'il soit possible de provoquer la transformation totale, lente ou explosive, de l'uranium, entourant une source, même faible, de neutrons. La transmutation se ferait ainsi à une grande échelle.

L'intérêt évident de cette opération dont la possibilité est actuellement bien confirmée, réside dans l'énergie énorme libérée. L'uranium pourrait un jour remplacer à bon compte

nos sources actuelles d'énergie qui nous paraîtraient alors misérables. Ce serait la première exploitation de l'énergie nucléaire disponible.

* * *

Ces quelques faits essentiels de la chimie nucléaire ne sont pas exposés dans l'ordre de leur découverte, ils sont plutôt groupés de manière à en faciliter l'intelligence.

La chimie nucléaire existerait sans doute depuis longtemps si l'on avait des sources naturelles et importantes de neutrons. Mais il a fallu réaliser les difficiles réactions nucléaires entre noyaux pour découvrir les neutrons, eux-mêmes plus difficiles à observer que les particules chargées.

Si l'on excepte les résultats escomptés dans le cas des réactions de rupture, l'on peut dire que la chimie nucléaire est une chimie où l'on travaille avec des quantités impondérables. La fabrication des projectiles est trop coûteuse et trop difficile pour qu'il soit possible de réaliser les bombardements intenses qui seraient nécessaires à la préparation de neutrons ou de corps radioactifs ne pesant même qu'un seul gramme. Il faut, en effet, un minimum de 100 000 projectiles chargés pour transformer un seul noyau. Si donc la transmutation est réalisée dans des centaines de cas, elle ne peut encore se faire à une grande échelle et l'on travaille en chimie nucléaire avec des quantités qui sont souvent de l'ordre de 10^{-18} grammes.

Le développement, si considérable, de la chimie nucléaire, est avant tout dû à la facilité avec laquelle il est possible de déceler les particules chargées et rapides. Cet avantage expérimental immense rend possible l'observation de la transformation nucléaire individuelle et permet de déduire des renseignements extrêmement précis sur le mécanisme des réactions nucléaires.

On comprend que la chimie nucléaire se soit développée en suivant une voie inverse de celle qu'a suivie la chimie classique, qui toujours s'occupe de collectivités atomiques innombrables.

Mais la précieuse facilité avec laquelle on peut déceler les atomes radioactifs peut être mise au service de la chimie classique et l'on peut en espérer, à juste titre, des progrès considérables dans l'étude des mécanismes des réactions chimiques ordinaires.

Les recherches de ce genre, à peine commencées, ont déjà donné quelques résultats, que ce soit en chimie minérale, organique, analytique ou biologique.

Etant donné que les atomes radioactifs ont exactement les mêmes propriétés chimiques que les atomes stables, ils peuvent servir avec facilité d'indicateurs. Il suffit dès lors de suivre la propriété de radioactivité pour savoir où se trouvent tous les atomes de la même espèce chimique.

C'est ainsi que l'on a pu se rendre compte que les deux atomes de soufre de la molécule d'hyposulfite ne sont pas capables de s'interchanger.

Pour le savoir, il a été procédé de la manière suivante:

Du soufre activé (quantité pondérable de soufre stable mélangé à une quantité impondérable de soufre radioactif) est introduit dans une solution alcaline de sulfite pour former l'hyposulfite.

Plus tard, avant que toute la radioactivité n'ait disparu, avant dix fois le temps de la période, le soufre de l'hyposulfite est précipité par acidification. Toute l'activité radioactive résidant dans le soufre précipité, il faut en conclure que les mêmes atomes qui se sont fixés sur la molécule du sulfite, s'en sont plus tard séparés.

Mais ce n'est là qu'une application. Chacun sait les espoirs que l'on attache à la radioactivité artificiellement produite aussi bien qu'au rayonnement de neutrons pour le développement futur de la biologie et de la médecine.

Les réactions entre noyaux qui ne peuvent se produire d'elles-mêmes sur notre planète, doivent avoir lieu tout naturellement dans les étoiles, dont la densité est de quelques centaines de milliers de fois celle de l'eau et la température supérieure au million de degrés centigrades. Les réactions nucléaires (formation d'hélions à partir de protons avec le carbone comme catalyseur) sont peut-être la source de la chaleur que nous recevons du soleil.