

50

CLÉS POUR COMPRENDRE LA **CHIMIE**

HAYLEY
BIRCH

Traduit de l'anglais par Paul Depovere

DUNOD

Table des matières

Introduction 3

01 Les atomes **4**

02 Les éléments **8**

03 Les isotopes **12**

04 Les composés **16**

05 L'assemblage **20**

06 Les changements de phases **24**

07 L'énergie **28**

08 Les réactions chimiques **32**

09 La notion d'équilibre **36**

10 La thermodynamique **40**

11 Les acides **44**

12 Les catalyseurs **48**

13 Les réactions redox **52**

14 La fermentation **56**

15 Le craquage **60**

16 Des synthèses chimiques **64**

17 Le procédé Haber **68**

18 La chiralité **72**

19 La chimie verte **76**

20 Les séparations chimiques **80**

21 La spectroscopie **84**

22 La cristallographie **88**

23 L'électrolyse **92**

24 La microfabrication **96**

25 L'auto-assemblage **100**

26 Un laboratoire sur puce **104**

27 La chimio-informatique **108**

28 Le carbone **112**

29 L'eau **116**

30 L'origine de la vie **120**

31 L'astrochimie **124**

32 Les protéines **128**

33 Le rôle des enzymes **132**

34 Les glucides **136**

35 L'ADN **140**

36 Les biosynthèses **144**

37 La photosynthèse **148**

38 Les messagers chimiques **152**

39 L'essence **156**

40 Les plastiques **160**

41 Les chlorofluorocarbures
(CFC) **164**

42 Les composites **168**

43 Les cellules solaires **172**

44 Les médicaments **176**

45 Les nanotechnologies **180**

46 Le graphène **184**

47 L'impression 3D **188**

48 Des muscles artificiels **192**

49 La biologie synthétique **196**

50 Les carburants de l'avenir **200**

Le tableau périodique 204

Index 206

Introduction

La chimie est bien souvent considérée comme une science de qualité inférieure. Je discutais dernièrement avec une chimiste qui me disait qu'elle en avait assez de constater que les gens pensent qu'elle est tout simplement une de ces personnes qui passent leur temps à manipuler des choses nauséabondes dans des laboratoires. La chimie est en quelque sorte assimilée à une science moins pertinente que la biologie et moins intéressante que la physique.

Voilà pourquoi, en tant qu'auteure d'un livre de chimie, mon défi sera de vous aider à oublier cette image négative et à abandonner cette notion d'infériorité. En effet – et peu le savent –, la chimie est en réalité la science la plus utile qui soit.

La chimie se trouve au cœur de pratiquement tout. Ses constituants, à savoir les atomes, les molécules, les composés et les mélanges, font partie du moindre grain de matière de notre planète. Ses réactions permettent d'entretenir la vie et de créer tout ce dont celle-ci dépend. Les produits issus de la chimie sont à la base des améliorations continues de nos existences, et cela va de la simple bière au short en Lycra.

La raison pour laquelle la chimie véhicule une image dégradée réside, selon moi, dans le fait que plutôt que de se focaliser sur les substances intéressantes, pertinentes, on s'enlise en essayant d'apprendre toutes sortes de choses : des formules moléculaires, des modes opératoires, etc. Et de fait, bien que les chimistes prétendent que ces règles et ces modes opératoires sont importants, la plupart d'entre eux conviendront que tout cela n'est pas particulièrement attrayant.

Dès lors, il ne sera pas beaucoup question de règles dans ce livre. Vous pourrez les retrouver dans d'autres ouvrages si vous le désirez. J'ai voulu me concentrer uniquement sur les aspects qui me semblent essentiels et intéressants. Ce faisant, j'ai essayé de véhiculer l'esprit de mon professeur de chimie, M. Smailes, qui m'a montré comment fabriquer du savon et du nylon et qui portait de superbes cravates.

01 Les atomes

Les atomes sont les briques de construction de la chimie, ainsi que de notre Univers. Ce sont les composants des éléments, des planètes, des étoiles et de vous-même. Le fait de comprendre les atomes, de savoir de quoi ils sont constitués et comment ils interagissent, permet d'expliquer la quasi-totalité des réactions chimiques au laboratoire, de même que dans la nature.

Bill Bryson affirmait que chacun de nous peut porter en soi jusqu'à un milliard d'atomes ayant appartenu jadis à William Shakespeare. «Génial!», pourriez-vous penser, «cela fait beaucoup d'atomes hérités de Shakespeare». Ma foi, c'est à la fois vrai et faux. D'une part, un milliard (1 000 000 000) correspond grosso modo au nombre de secondes que chacun de nous aura vécues lors de son 33^e anniversaire. D'autre part, un milliard est le nombre de grains de sel que pourrait contenir une baignoire ordinaire, et c'est aussi moins d'un milliardième de milliardième du nombre d'atomes que contient l'ensemble de votre corps. Ceci vous permet de comprendre d'une certaine façon à quel point un atome est petit – rien qu'en vous, il y en a plus d'un milliard de milliards de milliards –, ce qui signifie que vous n'avez même pas suffisamment d'atomes de la dépouille de Shakespeare pour confectionner un seul neurone.

Un peu comme une pêche Les atomes sont tellement minuscules que, jusqu'à récemment, il était impossible de les voir. Cet état de fait a changé avec l'invention de microscopes à très haute résolution, si bien que, dès 2012, des scientifiques australiens réussirent à prendre une photographie de l'ombre projetée par un atome isolé. En réalité, les chimistes n'ont pas toujours besoin de voir ces atomes pour comprendre que, à un certain niveau fondamental, ceux-ci peuvent expliquer une bonne part des choses qui se passent au laboratoire, ainsi que dans les processus vitaux. La plupart des réactions chimiques sont imputables à des particules subatomiques, encore plus petites, appelées électrons, qui constituent les couches externes des atomes.

Si vous pouviez tenir un atome dans votre main comme une pêche, son noyau, contenant des protons et des neutrons, correspondrait au noyau cen-

chronologie

Env. 400 av. J.-C.

Le philosophe grec Démocrite mentionne des particules indivisibles qu'il appelle des atomes

1803

Dalton propose sa théorie atomique

1904

Joseph John Thomson décrit son modèle «plum-pudding» de l'atome

tral de celle-ci, tandis que les électrons se retrouveraient dans la chair juteuse. En fait, si votre pêche ressemblait réellement à un atome, la majorité de ce fruit devrait être de la chair et son noyau serait si petit que vous pourriez l'avalier sans vous en rendre compte : ceci vous indique à quel point les électrons occupent le volume atomique. Mais le cœur est indispensable à la cohésion des constituants de l'atome. Il contient des protons, à savoir des particules positivement chargées qui exercent une attraction suffisante empêchant les électrons, négativement chargés, de s'enfuir dans tous les sens.

Théorie atomique et réactions chimiques

En 1803, le chimiste anglais John Dalton donna une conférence lors de laquelle il proposa une théorie de la matière basée sur l'existence de particules indestructibles appelées atomes. Il affirma, en substance, que des éléments différents doivent être constitués d'atomes différents, lesquels peuvent se combiner pour former des composés. Bref, les réactions chimiques impliquent un réarrangement des atomes.

Pourquoi un atome d'oxygène est-il un atome d'oxygène? Les atomes ne sont pas tous les mêmes. Vous avez déjà compris qu'un atome n'est pas strictement comparable à une pêche, mais allons un peu plus loin dans cette analogie. Il existe de nombreuses variétés (saveurs) d'atomes. Si votre pêche était un atome d'oxygène, il se pourrait qu'une prune soit, disons, un atome de carbone. Il s'agit toujours de sphères électroniques entourant un noyau minuscule, mais dont les caractéristiques diffèrent totalement. Les atomes d'oxygène virevoltent autour de nous par paires (O_2), tandis que le carbone reste agglutiné pour former des substances dures comme le diamant ou la mine de crayon (C). C'est le nombre de protons qui en fait des éléments différents (voir page 8). L'oxygène possède huit protons, soit deux de plus que le carbone. Des éléments lourds, vraiment volumineux, tels le seaborgium et le nobélium, abritent chacun plus de cent protons dans leurs noyaux atomiques. Lorsque trop de charges positives sont tassées dans ce noyau dont le volume est infiniment petit, chacune repoussant ses voisines, l'équilibre est facilement rompu, de sorte que les éléments lourds deviennent instables.

1911

Ernest Rutherford démontre l'existence d'un noyau atomique

1989

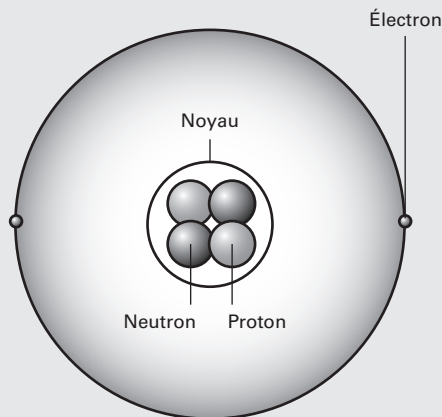
Des chercheurs chez IBM manipulent des atomes individuels afin d'orthographier « IBM »

2012

La découverte du boson de Higgs corrobore le modèle standard de l'atome

L'intérieur de l'atome

L'ancien modèle « plum-pudding » de J. J. Thomson assimilait l'atome à une sphère de pâte légère, porteuse de charges positives et présentant des raisins de Corinthe (négatifs) uniformément répartis. Ce modèle a été remplacé : nous savons à présent que les protons et les autres particules subatomiques (appelées neutrons) constituent le minuscule et dense centre de l'atome, et que les électrons forment un nuage autour de celui-ci. Nous savons aussi que les protons et les neutrons contiennent des particules encore plus petites qu'on appelle des quarks. Les chimistes ne s'attardent généralement pas sur ces plus petites particules : elles intéressent plutôt les physiciens, qui fracassent des atomes dans des accélérateurs de particules en vue de les identifier. Il est de fait important d'avoir à l'esprit que le modèle scientifique de l'atome ne cesse d'évoluer, de même que la façon dont la matière est censée s'assembler dans notre Univers. Ainsi, la découverte du boson de Higgs en 2012 confirma l'existence d'une particule que les physiciens avaient déjà incluse dans leur modèle et dont ils se servaient pour faire des prédictions à propos d'autres particules. Quoi qu'il en soit, il reste encore du travail à accomplir pour déterminer si c'est bien le même type de boson de Higgs qu'ils recherchaient.



Le noyau incroyablement dense d'un atome, autour duquel orbitent des électrons négativement chargés, contient des protons positivement chargés ainsi que des neutrons neutres.

Habituellement, un atome, quelle que soit sa saveur, contiendra autant d'électrons qu'il y a de protons dans son noyau. Si un électron vient à manquer, ou si l'atome en accapare un de plus, les charges positives et négatives ne se compensent plus, de sorte que l'atome devient ce que les chimistes appellent un « ion », c'est-à-dire un atome ou une molécule chargé-e. Ces ions sont importants parce que leurs charges permettent de maintenir assemblées toutes sortes de substances, tel le chlorure de sodium (le sel de table) ou le carbonate de calcium (le tartre).

Les briques de construction de la vie Outre le fait de former les ingrédients du placard des cuisines, les atomes se retrouvent dans tout ce qui marche, respire ou s'enracine, en construisant des molécules aussi

remarquablement complexes que l'ADN, ainsi que les protéines dont sont constitués nos muscles, os et cheveux. Ils réalisent tout cela en se liant (voir page 20) à d'autres atomes. Quoi qu'il en soit, une chose est intéressante au sujet de toute forme vivante sur Terre : malgré son extraordinaire diversité, la vie, sans exception, repose toujours sur un type d'atome particulier, à savoir le carbone.

« La beauté d'un être vivant n'est pas due aux atomes qu'il contient, mais à la manière dont ces atomes sont assemblés. »

Carl Sagan

Des bactéries extrémophiles présentes dans les failles dégageant des gaz brûlants au plus profond des océans aux oiseaux voltigeant dans le ciel, il n'existe aucune espèce vivante sur la planète qui ne partage pas cet élément qu'est le carbone. Cependant, étant donné que nous n'avons pas encore découvert de vie ailleurs, nous ne pouvons pas savoir si c'est par pure chance qu'elle a évolué de cette façon ou si celle-ci pourrait se développer en faisant intervenir d'autres types d'atomes. Les amateurs de science-fiction sont bien au courant des biologies alternatives : des êtres à base de silicium sont en effet apparus sous forme d'extraterrestres dans *Star Trek* et *Star Wars*.

Atome par atome Les progrès dans le domaine des nanotechnologies (voir page 180), qui permettent de tout obtenir, depuis des panneaux solaires plus efficaces à des médicaments capables de distinguer et de détruire les cellules cancéreuses, ont suscité un examen bien plus précis du monde des atomes. Les outils opèrent à l'échelle d'un milliardième de mètre – c'est encore plus grand qu'un atome, mais à cette échelle il devient possible d'envisager de manipuler individuellement des atomes et des molécules.

En 2013, des chercheurs de chez IBM réalisèrent la plus petite animation image par image au monde, mettant en scène un garçon jouant avec un ballon. Ce garçon et sa balle étaient tous deux constitués d'atomes de cuivre, tous identifiables individuellement dans le film. Bref, la science est parvenue à opérer à une échelle qui correspond à la vision qu'a le chimiste de notre monde.

L'idée clé
Des briques de construction

02 Les éléments

Il a fallu beaucoup de temps aux chimistes pour découvrir l'ensemble des éléments, c'est-à-dire les entités chimiques les plus fondamentales. Le tableau périodique nous fournit un moyen de les classer, bien que celui-ci ne soit pas qu'un simple catalogue. Des modèles évolutifs y apparaissent, lesquels nous fournissent des indications au sujet de la nature de chaque élément et quant à la manière dont ils sont censés se comporter lorsqu'ils rencontrent d'autres éléments.

En cette Allemagne du ^{xvii}^e siècle, Hennig Brandt était un alchimiste sans scrupule. Après son mariage, il renonça à son poste d'officier de l'armée et dépensa toute la fortune de sa femme pour lancer des recherches au sujet de la « pierre philosophale », une substance (ou un minéral) mystique que les alchimistes cherchaient à découvrir depuis des siècles. Selon la légende, cette pierre serait capable de « transmuter » de vils métaux tels que le fer ou le plomb en or. Lorsque sa femme décéda, Brandt en épousa une autre et poursuivit ses recherches de la même façon. Apparemment, il lui vint à l'idée que la pierre philosophale pouvait être synthétisée à partir de liquides corporels, de sorte que Brandt s'empressa de se procurer près de 7 000 L d'urine humaine pour effectuer des extractions. Finalement, en 1669, il fit une étonnante découverte, mais ce n'était pas la pierre philosophale. Lors de ses expériences, qui impliquaient des ébullitions et des séparations, il fut, sans le vouloir, la première personne à découvrir un élément grâce à des opérations chimiques.

Brandt venait d'obtenir un composé contenant du phosphore, qu'il appela « lumière froide » parce qu'il est lumineux dans l'obscurité. Il fallut cependant attendre les années 1770 pour que le phosphore soit reconnu en tant que nouvel élément. À cette époque, des éléments furent découverts un peu partout et, en une décennie seulement, des chimistes isolèrent l'oxygène, l'azote, le chlore et le manganèse.

En 1869, soit près de deux siècles après la découverte de Brandt, le chimiste russe Dmitri Mendeleïev conçut son tableau périodique, dans lequel le phosphore occupe la place qui lui revient, à savoir entre le silicium et le soufre.

chronologie

1669

Le phosphore est le premier élément découvert par des moyens chimiques

1869

Mendeleïev publie la première mouture de son tableau périodique

1913

Henry Moseley définit les éléments en fonction de leur numéro atomique

Décodage du tableau périodique

Dans le tableau périodique (voir pages 204-205), les éléments sont représentés par des lettres. Certaines sont des abréviations manifestes (comme Si pour silicium), tandis que d'autres (comme W pour tungstène) semblent injustifiées (elles sont souvent dues à des appellations désuètes). Le nombre qui se trouve habituellement en exposant à gauche de la lettre est le nombre de masse, c'est-à-dire le nombre de nucléons (protons et neutrons) que contient le noyau de l'élément. Le numéro figurant en dessous (numéro atomique) correspond à son nombre de protons.

Qu'est-ce qu'un élément ? Il y a bien longtemps, les «éléments» étaient censés être le feu, l'air, l'eau et la terre. Un cinquième élément, mystérieux, l'éther, fut ajouté pour justifier les étoiles qui ne pouvaient pas, selon le philosophe Aristote, être constituées d'un quelconque des éléments terrestres. Le mot «élément» vient du latin *elementum*, signifiant «principe premier» ou «forme la plus fondamentale», ce qui n'est pas une mauvaise description, bien qu'elle nous laisse perplexes quant à la différence existant entre les éléments et les atomes.

La différence est pourtant simple: les éléments sont des substances, en quantités quelconques, alors que les atomes sont des entités fondamentales. Un échantillon solide du phosphore de Brandt – au demeurant une substance chimique toxique et un composant des gaz neurotoxiques – constitue un ensemble d'atomes d'un élément particulier. Curieusement cependant, des échantillons de phosphore peuvent se présenter différemment parce que ses atomes peuvent s'y disposer de façon variée, ce qui en modifie la structure interne mais aussi l'apparence extérieure. En fonction de la disposition des atomes dans le phosphore, cet élément peut paraître blanc, noir, rouge ou violet. Et ces diverses variétés se comportent différemment, par exemple, en fondant à des températures distinctes. Alors que le phosphore blanc fond au Soleil lors d'une très chaude journée, le phosphore noir doit être chauffé à plus de 600 °C dans un four. Pourtant, tous deux sont constitués des mêmes atomes contenant chacun 15 protons et 15 électrons.

Modèles évolutifs dans le tableau périodique Pour le néophyte, le tableau périodique (voir pages 204-205) ressemble à un jeu Tetris un peu bizarre dans lequel – selon la version dont vous disposez – certaines des

1937

Création du premier élément artificiel, le technétium

2000

Des scientifiques russes produisent un élément superlourd, le livermorium

2010

Annnonce de la découverte de l'élément de numéro atomique 117 [« ununseptium », actuellement appelé tennessee, Ts (NdTr.)]

cases ne sont pas remplies. En pareil cas, il nécessite une sérieuse mise à jour. En réalité, il se présente actuellement sous une forme bien ordonnée, de sorte que tout-e chimiste pourra y retrouver ce qu'il-elle recherche dans ce méli-mélo apparent. Ceci résulte du fait que la conception ingénieuse de Mendeleïev laisse entrevoir des modèles évolutifs qui associent les éléments en fonction de leurs structures atomiques et de leurs comportements chimiques.

« Le monde des réactions chimiques est une scène... dont les acteurs sont les éléments. »

**Clemens Alexander Winkler,
découvreur de l'élément germanium**

Tout au long des rangées de ce tableau, de gauche à droite, les éléments sont disposés selon l'ordre croissant de leur numéro atomique, c'est-à-dire selon le nombre de protons de leur noyau. Mais ce

qui est génial dans le concept de Mendeleïev, c'est d'avoir remarqué que les propriétés des éléments se répétaient régulièrement, l'obligeant à passer à une rangée suivante. C'est donc au niveau des colonnes qu'apparaissent certains des concepts les plus subtils. Examinez la colonne à l'extrême droite, où les éléments s'échelonnent de l'hélium au radon. Ce sont les gaz nobles, tous incolores dans les conditions normales et tous particulièrement paresseux lorsqu'il s'agit de s'impliquer dans une quelconque réaction chimique.

Le néon, par exemple, est si peu réactif qu'il est impossible de l'amener à former un composé avec n'importe quel autre élément. Ceci est dû à sa configuration électronique. Dans tout atome, les électrons sont disposés en couches – ou orbitales – concentriques, lesquelles ne peuvent être occupées que par un certain nombre d'électrons. Dès qu'une orbitale est remplie, les électrons suivants devront aller se loger dans une autre orbitale, plus décentrée. Et comme le nombre d'électrons de tout élément augmente au prorata de son numéro atomique, chaque élément est caractérisé par une configuration électronique qui lui est propre. La caractéristique fondamentale des gaz nobles est que les orbitales les plus externes sont remplies. Une telle structure est très stable, ce qui signifie qu'il est difficile d'inciter ces électrons à réagir.

On peut mettre en évidence de nombreux autres modèles évolutifs dans le tableau périodique. Pour chaque élément, il faut fournir plus d'effort (d'énergie) pour arracher un électron de l'atome lorsqu'on se dirige de gauche à droite (jusqu'aux gaz nobles), et de bas en haut.

La partie centrale du tableau est essentiellement occupée par des métaux, lesquels deviennent d'autant plus métalliques que l'on s'approche du coin inférieur à l'extrême gauche. Les chimistes mettent à profit ces modèles évolutifs afin de prévoir comment les éléments se comporteront lors des réactions.

La chasse au plus lourd des éléments superlourds

Personne n'aime être dupé, mais cela arrive dans toutes les professions et la science ne fait pas exception. En 1999, des scientifiques du laboratoire *Lawrence Berkeley* en Californie publièrent un article annonçant la découverte de deux éléments superlourds, en l'occurrence le 116 (livermorium) et le 118 [ununoctium, actuellement appelé oganesson, Og, (NdTr.)]. Il y avait cependant quelque chose qui clochait. Ayant lu l'article, d'autres chercheurs tentèrent de reproduire ces expériences mais, quoi qu'ils firent, ils ne parvinrent absolument pas à mettre en évidence un seul atome du 116. Il s'avéra qu'un des « découvreurs » avait créé de fausses données, alors qu'il quittait un organisme gouvernemental américain sur un désaccord. L'article fut retiré et, l'année suivante, les applaudissements concernant la découverte allèrent à une équipe russe. Celui qui avait falsifié les données originales fut renvoyé. De nos jours, le prestige associé à la découverte d'un nouvel élément est tel que les scientifiques sont tentés de miser leur carrière tout entière sur un tel projet.

Des poids superlourds Comme la boxe, la chimie possède ses poids superlourds. Alors que les poids plumes voltigent tout en haut du tableau périodique – les atomes d'hydrogène et d'hélium n'ayant au total que trois protons –, ceux des rangées du bas ont plongé en raison de leurs lourds fardeaux nucléaires. Le tableau s'est en effet enrichi au cours du temps avec d'autres éléments plus lourds. Le numéro 92, l'uranium radioactif, est le dernier que l'on trouve à l'état naturel. Bien que la désintégration spontanée de l'uranium fournisse du plutonium, les quantités existantes dans la nature sont infiniment petites. Le plutonium a été découvert dans un réacteur nucléaire, tandis que les autres poids superlourds ont été obtenus dans des accélérateurs de particules. La chasse n'est pas encore finie mais, à coup sûr, elle est devenue bien plus compliquée que de faire bouillir des liquides corporels.

L'idée clé
 Les substances
 les plus simples

03 Les isotopes

Les isotopes ne sont pas que des substances mortelles qui servent à fabriquer des bombes et à empoisonner les gens. La notion d'isotope englobe de nombreux éléments chimiques qui diffèrent légèrement par le nombre de l'une de leurs particules subatomiques. Des isotopes sont présents dans l'air que nous respirons et dans l'eau que nous buvons. Vous pouvez même en utiliser (en toute sécurité) pour faire couler des glaçons.

La glace flotte sur l'eau. Sauf dans certains cas. C'est vrai lorsque tous les atomes d'un même élément sont les atomes habituels, mais pas lorsqu'ils se présentent différemment. Si on considère l'élément le plus simple, l'hydrogène, nous sommes d'accord pour dire que tous les atomes de cet élément possèdent un proton et un électron. Vous ne pouvez dire d'un atome qu'il s'agit d'un hydrogène que si celui-ci ne contient qu'un seul proton dans son noyau. Mais qu'advient-il si à ce proton solitaire venait s'adjoindre un neutron ? Serait-ce encore de l'hydrogène ?

Les neutrons furent la pièce manquante du puzzle qui échappa aux chimistes et aux physiciens jusque dans les années 1930 (voir « Les neutrons manquants », page 13). Ces particules neutres n'ont absolument aucune incidence sur la balance globale de charge dans l'atome considéré, alors qu'elles en modifient radicalement la masse. Et cette différence suffit pour faire couler les glaçons.

De l'eau lourde Insérer un neutron à côté du proton présent dans un atome d'hydrogène entraîne une différence énorme : ces atomes poids plumes voient leur nombre de nucléons doubler. L'« hydrogène lourd » qui en résulte est appelé deutérium (D ou ^2H) et, exactement comme les atomes d'hydrogène ordinaire le font, les atomes de deutérium s'accrochent à un atome d'oxygène pour former de l'eau. Bien sûr, cela n'aboutit pas à de l'eau ordinaire (H_2O). On obtient de l'eau contenant deux neutrons supplémentaires, en l'occurrence de « l'eau lourde » (D_2O) ou, pour l'appeler plus correctement, de l'oxyde de deutérium. Prenez de l'eau lourde – qui s'achète facilement via l'Internet – et faites-la congeler dans un bac à glaçons. Introduisez un de ces glaçons dans un

chronologie

1500

Les alchimistes tentent de « transmuter » des substances en métaux précieux

1896

Première radiothérapie visant à combattre le cancer

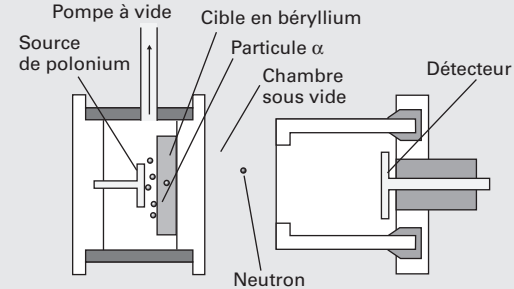
1920

Première description des « doublets neutres » (neutrons) par Ernest Rutherford

Les neutrons manquants

La découverte des neutrons par le physicien James Chadwick – qui poursuivit ses travaux dans le cadre de la bombe atomique – permit de résoudre le problème épineux de la masse atomique des éléments. Depuis des années, il était manifeste que les atomes de chacun des éléments étaient plus lourds qu'attendu. Pour Chadwick, les noyaux atomiques ne pouvaient pas raisonnablement peser autant qu'on le mesurait si ceux-ci ne contenaient que des protons. C'est comme si les éléments simulaient

leur départ en vacances avec leurs bagages pleins de briques. Malheureusement, personne ne parvenait à identifier ces briques. Cependant, Ernest Rutherford, le supérieur de Chadwick, lui suggéra que les atomes devaient cacher certaines particules subatomiques, qu'il avait appelées des « doublets neutres » (ou neutrons) dès 1920. En fait, il fallut attendre jusqu'en 1932 pour que Chadwick apporte la preuve incontestable de cette théorie. Il constata qu'en bombardant du béryllium (un métal d'aspect gris acier) avec des particules α émises par du polonium, il parvenait à détecter des particules subatomiques dénuées de charge, à savoir des neutrons.



La réaction qui provoque l'éjection de neutrons (n) à partir de la cible en béryllium est : ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^{12}_6\text{C}$

verre contenant de l'eau ordinaire et, hop, voilà qu'il coule ! En guise de comparaison, vous pouvez y adjoindre un glaçon ordinaire et vous émerveiller de la différence qu'apporte une particule subatomique dans un atome.

Dans la nature, seul un atome sur environ 6 400 atomes d'hydrogène possède un neutron en plus du proton. Mais il y a, en outre, un troisième type – ou isotope – d'hydrogène, et celui-ci est bien plus rare et plutôt difficile à manipuler sans danger à la maison. Le tritium est un isotope de l'hydrogène dans lequel chaque atome contient un proton et deux neutrons. Il est, toutefois, instable et, tout comme les autres éléments radioactifs, il se désintègre. Cet isotope intervient dans le mécanisme d'amorçage des bombes atomiques.

1932

James Chadwick découvre le neutron

1960

Le prix Nobel de chimie est décerné à Willard Libby pour la datation au carbone radioactif (carbone-14)

2006

Alexandre Litvinenko meurt à la suite d'un empoisonnement au polonium radioactif

Radioactivité Bien souvent, le mot «isotope» est suivi de l'adjectif «radioactif», de sorte que l'on pourrait croire que tous les isotopes sont radioactifs. Tel n'est pas le cas. Comme on vient de le voir, il est parfaitement possible d'avoir affaire à un isotope de l'hydrogène qui n'est pas radioactif, lequel est, en d'autres mots, un isotope stable. De même, il existe des isotopes naturels stables du carbone, de l'oxygène et de bien d'autres éléments.

Les isotopes instables, radioactifs, se désintègrent, ce qui signifie que leurs noyaux se transforment, en se débarrassant d'une partie de leur matière sous la forme de protons, de neutrons et d'électrons (voir l'encadré sur les types de rayonnements). De ce fait, leurs numéros atomiques changent, bref ils deviennent carrément de nouveaux éléments. Ceci aurait semblé être de la pure magie pour les alchimistes des XVI^e et XVII^e siècles, lesquels étaient obnubilés par la recherche de moyens permettant de transmuter un élément en un autre (ce dernier étant idéalement de l'or).

Les éléments radioactifs se désintègrent tous à des vitesses différentes. Le carbone-14, une forme de carbone comprenant 8 neutrons dans son noyau au lieu des 6 habituels, se laisse manipuler sans précautions particulières. Si l'envie vous prenait de doser un gramme de carbone-14 et de l'abandonner ensuite sur le rebord d'une fenêtre, vous devriez attendre longtemps pour que ses atomes se désintègrent. Il faudrait laisser passer 5 700 années avant que la moitié des atomes de carbone de votre échantillon se soient désintégrés. Cette période de temps, ou taux de désintégration, s'appelle la demi-vie. En revanche, le polonium-214 présente une demi-vie de moins d'un millième de seconde, ce qui signifie que dans le monde parallèle loufoque où vous seriez amené à doser un gramme de polonium radioactif, vous n'auriez même pas eu la chance de le poser sur le rebord de votre fenêtre avant qu'il ne se soit totalement désintégré en émettant des rayonnements dangereux.

Types de rayonnements

Le rayonnement α correspond à deux protons et deux neutrons, c'est-à-dire à un noyau d'atome d'hélium. Peu pénétrant, il peut être arrêté par une feuille de papier. Le rayonnement β représente des électrons rapides, lesquels pénètrent la peau. Quant au rayonnement γ , il s'agit d'énergie électromagnétique, comme la lumière, et celui-ci ne peut être arrêté que par une certaine épaisseur de plomb. Les effets des rayons γ sont très destructeurs, et dans certains cas sont mis à profit pour anéantir les tumeurs cancéreuses.

L'ancien espion russe Alexandre Litvinenko a été tué par un isotope plus stable du polonium, lequel se désintègre pendant des jours (plutôt que des secondes), bien qu'avec la même issue fatale. Dans le corps humain, les rayonnements émis par les noyaux de polonium-210 qui se désintègrent s'attaquent aux cellules et provoquent des douleurs, des nausées ainsi qu'un blocage du système immunitaire. Lors des enquêtes sur ce décès, les spécialistes ont dû rechercher les produits issus de la désintégration du polonium, car le polonium-210 lui-même n'était plus présent.

« Rares sont les découvertes en chimie ayant eu un tel impact sur tant de domaines de l'activité humaine. »

Professeur A. Westgren, lors de la remise du prix Nobel de chimie à Willard Libby (pour sa datation au radiocarbone)

Retour vers le futur Les isotopes radioactifs peuvent être mortels, mais ils peuvent également nous aider à comprendre notre passé. Le carbone-14 que nous avons laissé se désintégrer lentement sur un rebord de fenêtre présente deux utilités scientifiques classiques: la datation des fossiles au radiocarbone ainsi que la reconstitution des climats du passé. Étant donné qu'ils disposent d'une bonne estimation quant à la demi-vie de désintégration des isotopes radioactifs, les spécialistes sont capables de calculer – en analysant les teneurs de divers isotopes – l'âge d'objets anciens, de cadavres d'animaux, voire d'atmosphères anciennes préservées dans de la glace. Tout animal a dû respirer de faibles quantités de carbone-14 naturel – sous forme de dioxyde de carbone – au cours de son existence. Ceci s'arrête dès que l'animal meurt, de sorte que le carbone-14 en lui commence à se désintégrer. Sachant que la demi-vie du carbone-14 vaut 5 700 ans, les scientifiques peuvent calculer l'époque où l'animal en question est mort.

Les carottes de glace extraites de calottes polaires ou de glaciers qui ont gelé il y a des milliers d'années fournissent, grâce à leurs teneurs en isotopes, une chronologie des modifications atmosphériques de l'époque. Ces incursions dans le passé de notre planète peuvent nous aider à prévoir ce qu'il adviendra dans le futur, sachant que les concentrations de dioxyde de carbone continuent à évoluer.

L'idée clé

Ce qu'un neutron change

04 Les composés

En chimie, il y a des substances qui ne contiennent qu'un élément et d'autres, en l'occurrence les composés, qui en contiennent plusieurs. C'est lorsque des éléments sont assemblés que l'extraordinaire diversité de la chimie devient apparente. Et il est bien difficile d'estimer le nombre de composés chimiques existants, de nouveaux produits de synthèse (aux usages multiples) venant s'ajouter à la liste chaque année.

Il arrive parfois en science qu'une découverte contredise ce que chacun acceptait comme une loi fondamentale. Pendant un certain temps, les scientifiques se grattent la tête et se demandent s'il y a une erreur quelque part ou si des données ont été truquées. Puis, lorsque les preuves deviennent finalement irréfutables, les manuels doivent être réécrits, tandis qu'un secteur de recherche entièrement nouveau s'ouvre à la science. Tel fut le cas lorsque Neil Bartlett découvrit un nouveau composé particulier en 1962.

Alors qu'il travaillait seul dans son laboratoire un vendredi soir, Bartlett fit une découverte surprenante. Il avait permis à deux gaz – du xénon et de l'hexafluorure de platine – de se mélanger, ce qui fit apparaître un solide jaune. Il s'avéra que Bartlett venait de former un composé du xénon. Rien d'étonnant, vous diriez-vous, bien qu'à l'époque, la plupart des scientifiques estimaient que le xénon, au même titre que les autres gaz nobles (voir page 10), était totalement inerte et incapable de former des composés. La nouvelle substance fut nommée hexafluoroplatinate de xénon et le travail de Bartlett amena bientôt d'autres chimistes à tenter de créer de nouveaux composés de gaz nobles. Durant les quelques décennies qui suivirent, pas moins d'une centaine furent synthétisés. De tels composés contenant ces éléments nobles ont été utilisés depuis pour obtenir des substances antitumorales ou pour servir en chirurgie ophtalmique par laser.

Établir un partenariat Le composé de Bartlett fut peut-être un virage, mais son histoire n'est pas que l'exemple d'une découverte scientifique venant bouleverser une «vérité» largement reconnue. Cela rappelle également le fait que

chronologie

1718

Conception, par Étienne-François Geoffroy, d'une « table d'affinités » montrant comment les substances se combinent

Début des années 1800

Claude-Louis Berthollet et Joseph Louis Proust cherchent à connaître les proportions dans lesquelles les éléments se combinent