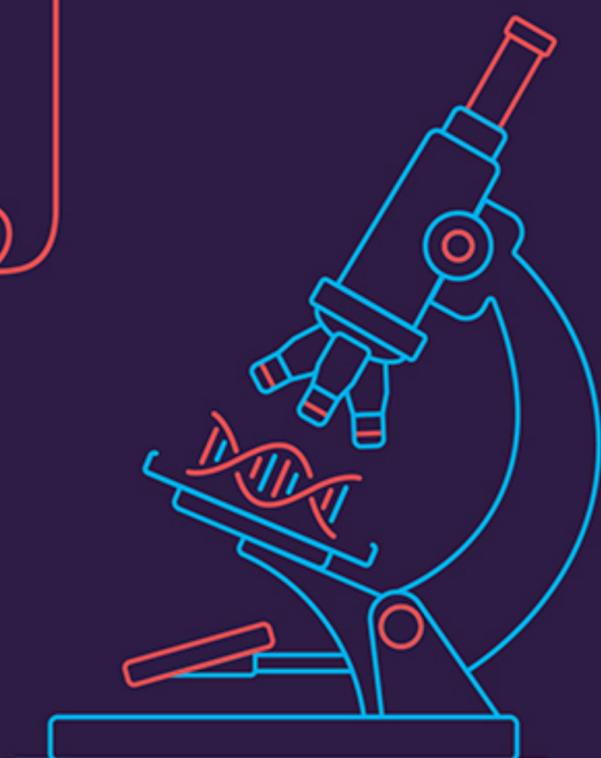
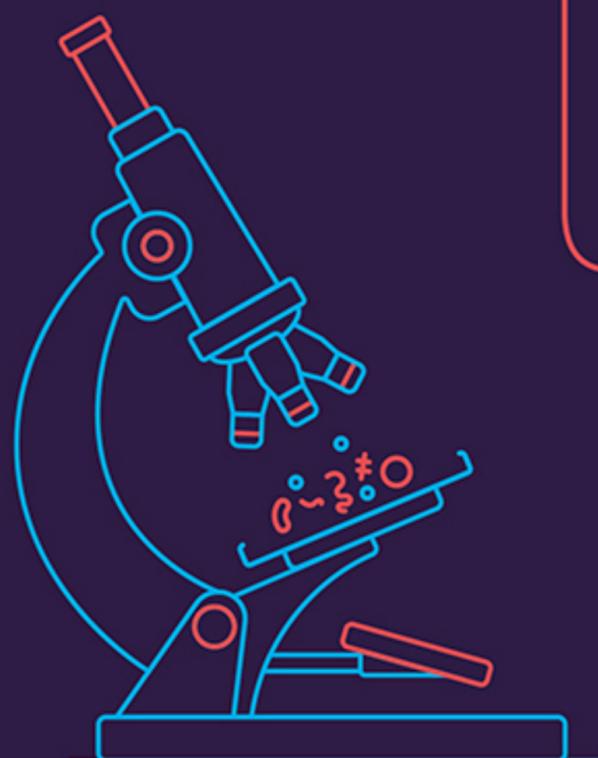
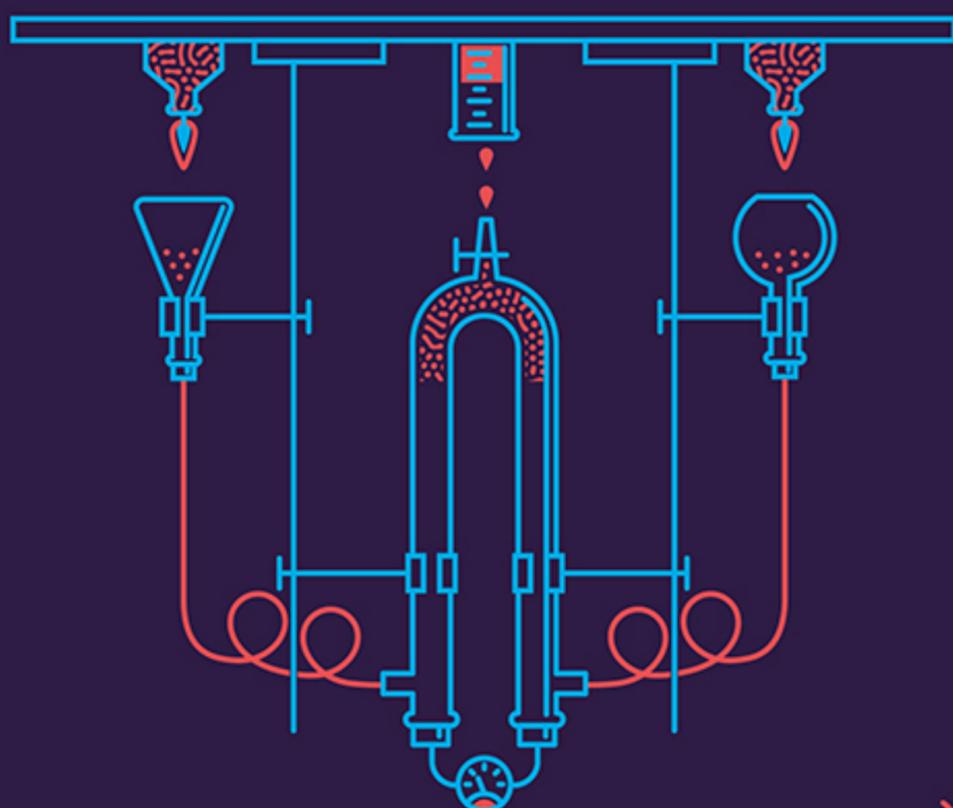




FABRICE CHEMLA



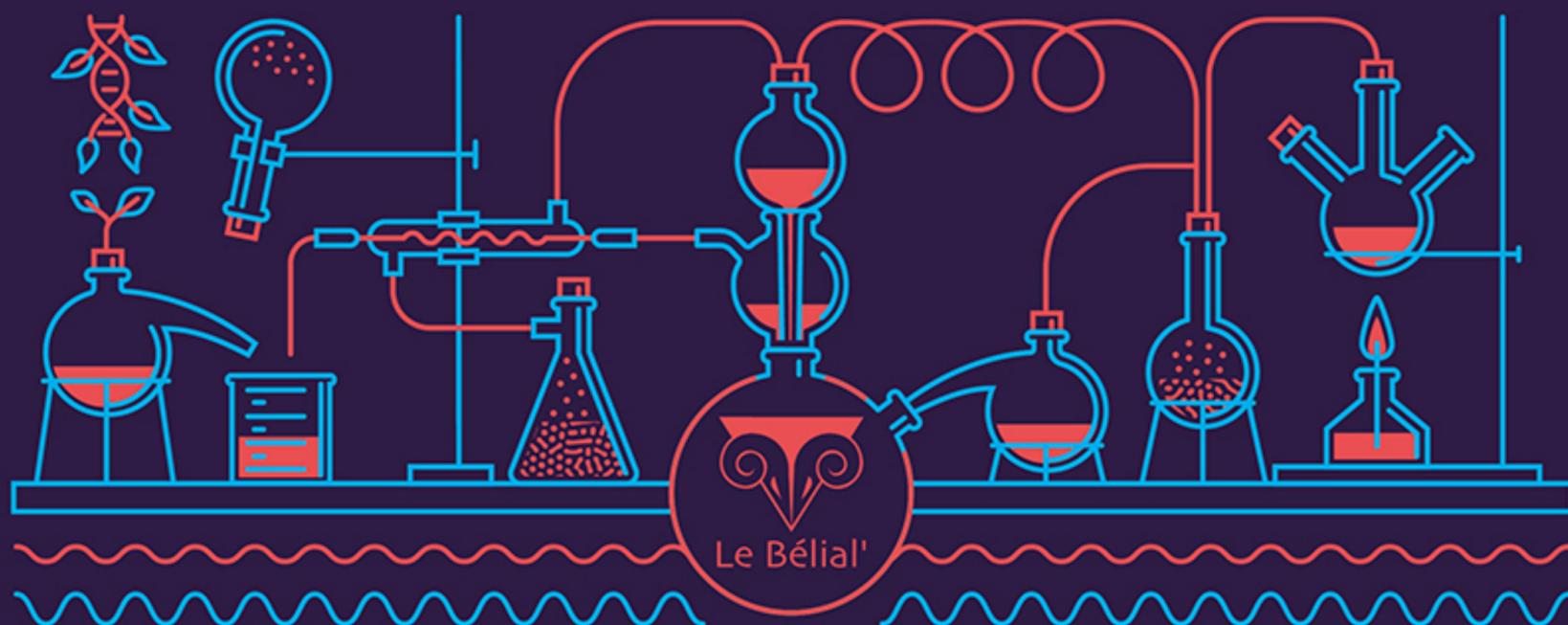
LE

LABORATOIRE

DE

L'IMAGINAIRE

LA CHIMIE DANS LA SCIENCE-FICTION



Dans la collection « Parallaxe »
aux éditions du Béliat'

- *La science fait son cinéma*, de Roland Lehoucq et J.-Sébastien Steyer
- *Comment parler à un alien ?*, de Frédéric Landragin
- *Station Metropolis direction Coruscant*, d'Alain Musset
- *Comment parle un robot ?*, de Frédéric Landragin
- *Dune – exploration scientifique et culturelle d'une planète-univers*,
sous la direction de Roland Lehoucq
- *Cyberpunk's Not Dead*, de Yannick Rumpala
- *Neuro-Science-Fiction*, de Laurent Vercueil
- *La Vie alien*, de Roland Lehoucq, J.-Sébastien Steyer et Laurent Genefort
- *Dictionnaire utopique de la science-fiction*, d'Ugo Bellagamba
- *Scientifiction – La Physique de l'impossible*, de Roland Lehoucq

Si vous voulez être tenu au courant de nos publications,
écrire aux auteurs, illustrateurs, ou recevoir un
bon de commande complet, deux adresses :

Le Béliat'
35, avenue de la Gare
77250 Moret-Loing-et-Orvanne
France
ou
www.belial.fr

Venez discuter avec nous sur <http://forums.belial.fr>

Collection « Parallaxe » dirigée par Roland Lehoucq

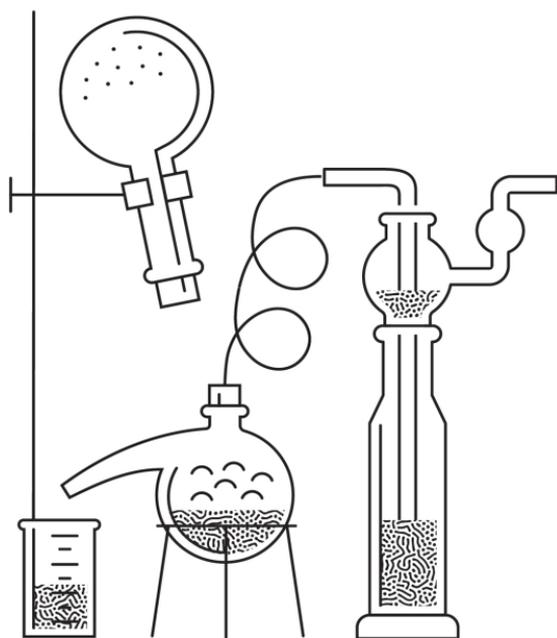
© 2024, Fabrice Chemla pour le texte et les figures
sauf Figure 3 © Dhatfield BY-SA 3.0 X

© 2024, le Béliat', pour la présente édition
Couverture et illustrations intérieures © 2024, Cedric Bucaille

Merci à Emma Gambaro pour la maquette et la relecture.

« L'intérieur de la boîte était composé d'un extraordinaire enchevêtrement de compartiments, contenant des fioles remplies de liquides bleus, de pots pleins de solides rouges, de tubes transparents garnis de substances jaunes, vertes, orange, mauves et bien d'autres encore... On apercevait au fond sept montages compliqués qui paraissaient avoir été conçus par des amateurs de radio en délire. Il s'y trouvait également un livre. »

W. Tenn, « *Jeu d'enfant* »



INTRODUCTION.

N° 01



TOUT LE MONDE croit connaître la chimie, mais peu de gens sont réellement capables de la définir. D'après le dictionnaire Robert en ligne, la chimie est la « *science qui étudie les divers constituants de la matière, leurs propriétés, transformations et interactions* ». Mais cette définition n'est pas tout à fait la même que celle qu'on peut trouver en 1863 dans le Littré : « *science dans laquelle on étudie les lois de la composition des corps cristallisables ou volatils, naturels ou artificiels, et les lois des phénomènes de combinaison ou de décomposition résultant de leur action moléculaire les uns sur les autres.* » Même l'origine du mot « chimie » est discutée : il dérive du latin médiéval *chimia*, mais ce terme peut provenir du grec *χυμια* (*khymia*, « art relatif aux sucs (des plantes) » ou *χημια* (*khemia*, « action de fondre du minerai »). Toujours d'après le Littré, cette dernière racine relierait la chimie à « Cham », nom de l'ancêtre mythique de l'Égypte, supposée la patrie première des arts chimiques⁽¹⁾.

Tout est dit dans cette discussion étymologique : les origines de la chimie plongent dans la nuit des temps, mais sa définition reste évolutive. Comme le soulignent Bernadette Bensaude-Vincent et Isabelle Stengers, autrices d'une *Histoire de la chimie* écrite à la lumière des conceptions épistémologiques les plus récentes⁽²⁾, « *la chimie naît-elle avec l'élaboration et la transmission de savoirs pratiques ? Dans ce cas, il faut remonter à la préhistoire, aux premiers hommes qui firent du feu, aux premiers procédés de teinture, de fermentation, aux premières pharmacopées. Ou bien débute-t-elle avec les premiers éléments de savoir raisonné ? [...] Il faut alors partir des présocratiques et des philosophies de la matière qui tentèrent de penser la substance*

et ses transformations. Avec l'articulation entre expériences et théorie ? Alors c'est toute l'alchimie qui s'avance. Ou faut-il s'en tenir à la chimie identifiée comme science ? Et dans ce cas c'est le XVII^e siècle qui s'impose comme origine », avec Robert Boyle (1627-1691), Ernst Georg Stahl (1660-1734), puis Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794).

La question de l'identité de la chimie est également problématique. Ensemble de savoirs aux multiples facettes, aux ramifications innombrables, s'intéressant aux profondeurs de la terre, comme aux nuages interstellaires, impliquée dans l'agriculture, la métallurgie, dans l'industrie du verre, des ciments et des céramiques, la pharmacie, les textiles, l'industrie lourde... la chimie est multiforme. Mais à force d'être partout, cette discipline a fini par ne plus être nulle part : qui sait que dans le processus de fabrication d'une simple fourchette, objet banal par excellence, six des dix opérations élémentaires mises en jeu impliquent une transformation chimique ⁽³⁾ ? Dans l'esprit du public, la chimie est devenue synonyme de pollution, d'extraction forcenée des ressources, de mise en danger des biotopes et des humains...

Il n'est pas question ici de nier la responsabilité de l'industrie chimique dans ces dégâts environnementaux. Mais qui se rappelle également que la chimie a été au XIX^e siècle un des moteurs les plus puissants de la croissance industrielle, au point que Jules Verne considérait que le développement d'une nation se mesurait à la quantité d'acide sulfurique qu'elle était capable de produire ? Qui sait que la mise au point dès 1913 du procédé Haber-Bosch de fabrication de l'ammoniac à partir de l'azote atmosphérique a autorisé la fabrication d'engrais azotés permettant de nourrir (d'une manière inégale, mais ceci est un autre problème) la population mondiale actuelle, là où les 1,5 milliard d'hectares de terres cultivées aujourd'hui, sans les engrais azotés, suffiraient à peine pour faire vivre seulement trois milliards de personnes suivant un régime ali-

mentaire typique de 1900 (c'est-à-dire insuffisant) ⁽⁴⁾ ? Qui se rappelle que les sulfamides, les antibiotiques, les corticoïdes et les contraceptifs sont des créations de la chimie ?

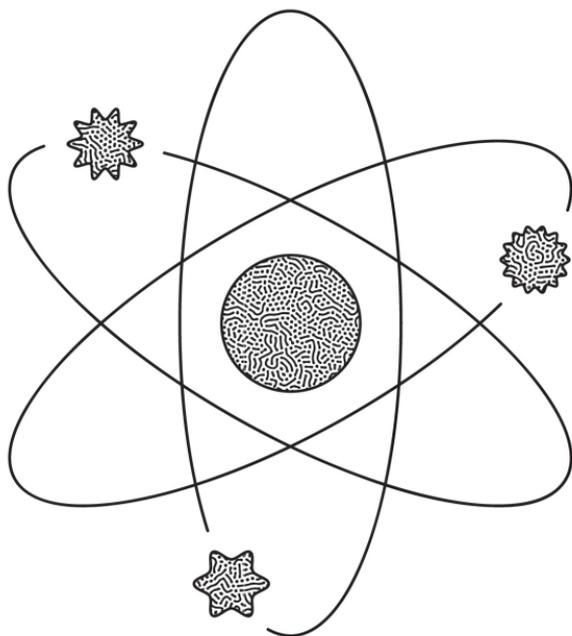
Ce livre est divisé en plusieurs chapitres, abordant de nombreux aspects de cette chimie multiforme : du microscopique (structure des atomes, nature des éléments, liaison intra- et inter-moléculaire) au macroscopique (gaz, liquides et cristaux, transformations chimiques, cycles biogéochimiques terrestres, xénobiochimie) en passant par diverses applications (parfums, explosifs, drogues diverses...). Dans ma quête d'exemples où la chimie est mise en scène par la science-fiction, je me suis retrouvé confronté aux difficultés évoquées plus haut : dans les littératures de l'imaginaire comme dans la vie, la chimie est partout et nulle part à la fois. On trouvera donc au fil de ces pages de nombreuses citations tirées de multiples exemples : rares sont les œuvres d'imaginaire consacrées essentiellement à la chimie. Les références bibliographiques précises des œuvres convoquées sont regroupées à la fin de ce livre. Bonne lecture !

(1). Cette interprétation est sujette à un grand nombre de polémiques encore bien actuelles entre afrocentristes et eurocentristes. D'après certains auteurs comme Cheikh Anta Diop, le mot « Kemet » (le pays de la terre noire, l'Égypte) serait à l'origine étymologique de la racine biblique kam, « Cham », deuxième fils de Noé et ancêtre biblique des Égyptiens.

(2). Bensaude-Vincent, Bernadette, Stengers, Isabelle (2001).

(3). Pour l'esprit curieux, les opérations nécessaires sont les suivantes : 1. Transformation du minerai de fer en fonte (haut-fourneau, opération chimique); 2. Conversion de la fonte en acier (convertisseur, opération chimique); 3. Transformation de l'acier en alliage (mise à nuance, opération chimique); 4. Coulée en lingot (opération chimique); 5. Laminage; 6. Découpage; 7. Façonnage; 8. Traitement thermique (opération chimique); 9. Traitement de surface (opération chimique); 10. Polissage.

(4). Pour une excellente analyse de l'impact du procédé Haber-Bosch sur la résolution de la crise malthusienne de la surpopulation terrestre et le développement de l'agriculture, voir Morton, Oliver (2015).



VOYAGER DANS LES ATOMES.

N° 02

UNE HISTOIRE DE LA REPRÉSENTATION DES ATOMES
LA REPRÉSENTATION QUANTIQUE



« *J'AVAIS L'IMPRESSION de me trouver à l'intérieur d'une grotte immense [...] Les parois étaient extraordinairement rugueuses et crevassées, avec une curieuse lueur phosphorescente sur les parties en projection et de la noirceur dans les creux [...] Mais ce n'était pas la noirceur, l'absence de lumière, telle que nous la connaissons. C'était une obscurité qui paraissait aussi diffuser de la lumière... »*

C'est ainsi que le Chimiste raconte ce qu'il a vu dans l'infiniment petit, dans la célèbre nouvelle de Ray Cummings, « *La fille dans l'atome d'or* ». Cette nouvelle, parue en 1919, connut un franc succès et Ray Cummings lui donna deux suites, *People of the Golden Atom* et *The Princess of the Atom*, malheureusement non traduites en français.

Le Chimiste, héros et narrateur de l'histoire, a inventé et construit un microscope surpuissant lui permettant de plonger aux tréfonds de la matière. Durant ses observations, en examinant l'alliance en or de sa mère au niveau atomique, il a découvert une jeune fille qui se promenait sur la surface d'un atome d'or et en est tombé immédiatement amoureux. Il invente alors un produit chimique capable de réduire la taille de ceux qui l'ingèrent (ainsi que leurs vêtements, bien sûr... nous sommes en 1919 !) et par ce moyen, rejoint la fille de ses rêves dans l'atome. Évidemment, le danger et l'aventure seront de la partie, mais il rencontrera également l'amour.

L'atome comme une boule de billard

La description que fait le Chimiste de l'atome d'or est bien éloignée de notre conception actuelle de la structure des atomes. L'atome qu'il visite ressemble tout d'abord à un caillou,

puis, au fur et à mesure que le héros rétrécit, se révèle être une sphère creuse, qui contient un soleil central ; les habitants de ce monde, appelé « l'Oroïde », vivent sur la surface intérieure de la sphère, qui, à l'échelle de notre visiteur, lui semble avoir une dimension d'environ dix mille kilomètres de diamètre, ce qui est très faible comparé à notre Système solaire.

La conception de la matière, au début du siècle, était très différente de celle que nous avons aujourd'hui. La plupart des scientifiques s'accordaient à penser que la matière est construite selon le modèle de Thompson (1856-1940), physicien britannique qui avait découvert l'électron en 1897. Il proposait alors que la matière est constituée de globules — les atomes — de charge positive au sein desquels les électrons, comme des grains de charge négative, se promènent librement (Figure 1). Ce modèle de Thompson, appelé également de manière imagée « modèle du plum-pudding » ou « modèle

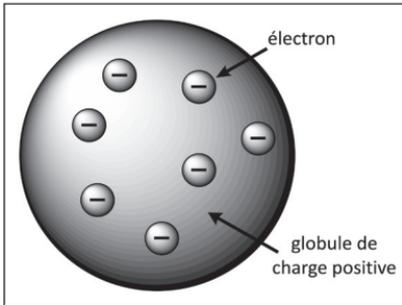


FIGURE 1. Modèle de Thompson.

du cookie aux pépites de chocolat », a été la représentation principale de la matière au début du xx^e siècle. C'est cette conception que l'on retrouve dans le paysage que décrit le Chimiste de Cummings : *« cette région que j'ai traversée est un désert aride, simplement constitué des atomes de ce que nous appelons de l'or. »*

Quelques années plus tard, en 1923, le court roman de Austin Hall, *Les Voyageurs de la comète*, décrit un paysage atomique très différent : *« l'atome est un véritable système solaire similaire à notre soleil et nos planètes, il est soumis aux mêmes lois, à l'exception d'une différence dans le degré de vibration. »* Le principe de la structure de l'atome comme système planétaire en miniature devenait une évidence. Cette vision permettait de

plus une mise en abyme intéressante puisqu'on pouvait envisager que ce mini-système planétaire contienne également des mini-atomes, eux-mêmes constituant des mini-systèmes, et ainsi à l'infini. Austin Hall ne s'en prive pas : « *les habitants [de la Terre] seraient simplement la population d'un nouvel atome, et notre soleil, malgré sa taille, représenterait un ion par rapport aux espaces infinis environnants. De plus, je supposai qu'à l'instar des atomes liés l'un à l'autre par une attraction puissante, notre système solaire est lié par les lois cosmiques au reste de notre univers qui, étant un et indivisible, forme la matière ! [...] je proposai d'étudier plutôt le secret de notre propre système solaire considéré comme un atome, et de rechercher si possible la force secrète de cohésion qui relie notre système solaire, suivant des relations déterminées, au reste des étoiles.* » Le héros-narrateur, archétype du héros blond et musclé, apparaît d'une manière soudaine sur notre Terre : il vient d'un univers d'une échelle supérieure à la nôtre et dans lequel notre Système solaire constituerait un atome. Il a juste le temps de raconter son histoire, puis il rétrécit pour disparaître dans l'atome d'un ongle de pouce. Magnifique construction en abyme des univers emboîtés les uns dans les autres !

Mais le roman d'Austin Hall de 1923 était passé quasi-inaperçu, sans doute en raison de son intrigue un peu filandreuse. En 1928, la nouvelle « *Le sous-univers* » de Roman F. Starzl décrit le même type de conception et une aventure similaire : « *L'atome, avec son noyau central et ses satellites appelés électrons, n'est en réalité qu'un univers en réduction, en fait, et non seulement par analogie, nous pourrions affirmer sans crainte que les éléments de l'infra-univers au-dessous de nous et le super-univers au-dessus de nous ne sont que les maillons d'une même chaîne s'étirant à l'infini !* »

D'une manière assez curieuse, la même proposition est faite la même année par Maurice Renard, dans son livre *Un homme chez les microbes* : « *Ce que nous appelons un atome mesure dia-*

métralement un dix-millionième de millimètre ; or l'atome est un système solaire analogue au nôtre, un système solaire où des planètes, cinquante mille fois plus petites que l'atome, tournent autour d'un astre central comme tourne la Terre autour du Soleil ; et ces soleils infinitésimaux, plus petits que leurs planètes, sont mille millions de millions de fois plus petits qu'un millimètre. Et tout porte à supposer que ces mondes minuscules en contiennent d'autres, qui eux-mêmes en contiennent d'autres, inépuisablement. » Autant Maurice Renard ne se trompait pas sur la taille de l'atome (1 Å, soit un dixième de millionième de millimètre, soit 10^{-10} m, autant il sous-estimait la taille du noyau atomique : celui-ci mesure plutôt 1 femtomètre, soit 10^{-15} m et est donc environ 100 000 fois plus petit que l'atome.

Cette proposition, faite simultanément des deux côtés de l'Atlantique, est en fait beaucoup plus ancienne, puisque le philosophe Leibniz (1646-1716) émettait déjà cette hypothèse dans une lettre au mathématicien et physicien Jean Bernoulli : *« Quant à moi, je ne crains pas d'avancer qu'il y a dans l'univers des animaux qui sont, en grandeur, autant au-dessus des nôtres que les nôtres sont au-dessus des animalcules qu'on ne découvre qu'à la faveur du microscope ; car la nature ne connaît point de terme. Réciproquement, il se peut, et même il doit se faire qu'il y ait dans de petits grains dépoussiérés, dans les plus petits atomes, des mondes qui ne soient point inférieurs au nôtre en beauté et en variété. »* Bien avant lui, le mystique iranien Rûmi, au XIII^e siècle, avançait : *« si tu coupes un atome, tu y trouveras un soleil, et des planètes qui tournent alentour. »*⁽¹⁾

La notion d'atome est une très ancienne idée. Elle avait déjà été proposée par Démocrite⁽²⁾, philosophe grec du V^e siècle avant notre ère, et développée par Épicure au IV^e siècle⁽³⁾. Les philosophes atomistes postulaient que la Nature est constituée de vide et des atomes, particules insécables (d'où le nom, qui signifie en grec « qui ne peut pas être coupé »), en perpétuelle agitation. L'agrégation et la condensation de ces atomes pro-

duit les corps sensibles que nous percevons. Cette idée sera reprise tout au long de l'Antiquité, comme par Lucrèce ⁽⁴⁾ au premier siècle avant notre ère, et par les philosophes de l'Islam du Moyen-Âge, comme Rûmi ⁽⁵⁾. Mais les arguments étayant cette théorie restaient d'ordre métaphysique et ne s'appuyaient pas sur la perception sensible.

Changements de taille et changements de temps

Au début des années 30, le voyage dans les atomes est donc devenu l'équivalent infinitésimal de celui dans les étoiles. Mais ce périple n'est pas sans danger ! Déjà, dans le roman *Les Voyageurs de la comète* d'Austin Hall, c'est ce que comprend le héros à son grand désespoir : en grandissant à une échelle qui l'a amené à la taille de l'univers supérieur, son temps physiologique s'est ralenti. Lorsqu'il rétrécit à nouveau, il s'est écoulé plusieurs millions d'années sur notre Terre, alors que le voyage vers l'infiniment grand lui a semblé durer quelques jours.

La même mésaventure arrive au jeune Fléchambeau, le héros du récit conté par Maurice Renard. Elle se produit également dans la nouvelle de Starzl, avec une conséquence assez cocasse : le directeur du laboratoire où se déroule l'expérience envoie son héros, un assistant intrépide, dans le monde atomique en le rétrécissant par des irradiations d'un nouveau rayon cosmique. Ce jeune homme, accompagné de la fille du directeur, doit rester sur un atome de carbone pendant une demi-heure. Quand son patron inverse le phénomène au bout du temps imparti, il voit grossir plusieurs centaines de créatures humaines. Lorsqu'elles sont de la taille suffisante, elles lui permettent de comprendre que la foule qu'il vient de ramener est constituée des lointains descendants de ses deux envoyés. Car l'écoulement du temps, à cette échelle atomique, a également subi une distorsion : « *Il est vrai que le sous-univers est semblable au nôtre, il est exact que les électrons tournent en orbite comme nos planètes autour des*

soleils, mais je n'avais pas réfléchi qu'avec l'immense différence de taille il devait exister aussi une différence de temps. Il faut un an à la Terre pour tourner autour du soleil ; un électron fait le tour de son noyau positif des millions de fois par seconde⁽⁶⁾. Cependant, à chaque fois qu'il achève son orbite, cela équivaut à un an pour ses habitants. Avant que j'aie eu le temps de cligner de l'œil, Hale et Shirley avaient vécu, aimé, disparu et plusieurs générations de leurs enfants s'étaient succédé... »

Du plein au vide : la révolution atomiste

En 1919, dans la nouvelle de Ray Cummings, l'atome n'est encore qu'un globule de matière. Une dizaine d'années plus tard, il est devenu un système planétaire, avec son soleil et ses planètes. Que s'est-il donc passé pour expliquer un tel changement de perspective ?

En 1909, la représentation des atomes comme des boules de billard est bouleversée par une expérience majeure, connue sous le nom d'« expérience de la feuille d'or », et menée sous la direction du chimiste néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937). Sa découverte révolutionnaire de la désintégration atomique⁽⁷⁾, qui remettait en cause le principe de l'indestructibilité de la matière, lui avait déjà valu le prix Nobel de chimie en 1908.

Rutherford réalise alors une expérience, dans laquelle il bombarde une feuille d'or très fine par un faisceau d'électrons. Il observe que la plus grande partie du faisceau traverse purement et simplement la feuille, mais qu'une petite partie des électrons est déviée dans toutes les directions de l'espace, en particulier vers leur source. Rutherford n'arrivera à formaliser ces résultats qu'en 1915 : la matière est surtout constituée de vide, et l'atome contient un très petit noyau positif en son centre, qui permet de faire dévier quelques électrons !

Il faut insister sur l'aspect révolutionnaire de cette découverte : la proposition d'une matière principalement vide avait

déjà été faite par certains philosophes grecs de l'Antiquité, comme cela a été évoqué plus haut, mais cela restait une hypothèse métaphysique, sans aucun fondement expérimental. La découverte de Rutherford conduisait à la même proposition totalement contre-intuitive, mais elle était démontrée par l'expérience sensible.

Ce résultat lui permit de mettre au point un nouveau modèle, appelé « modèle de Rutherford » et selon lequel la matière, essentiellement vide, est formée d'atomes, eux-mêmes constitués de noyaux chargés positivement autour desquels tournent des électrons chargés négativement (Figure 2).

Le modèle planétaire de l'atome était né ! C'est ce nouveau modèle qu'Austin Hall, puis Roman F. Starzl et Maurice Renard utiliseront dans leurs œuvres. Cette idée de l'atome comme système planétaire aura la vie longue, et sera reprise dans d'autres romans de science-fiction des années 50, comme dans *Kilsona, monde atomique*, de Festus Pragnell, ou le très dispensable *Le Pionnier de l'atome*, de Jimmy Guieu.

Pourtant, déjà, certains auteurs de SF qui se tenaient au courant des dernières découvertes scientifiques avaient commencé à modifier leurs représentations. Dans sa nouvelle « *Les étoiles sont des prisons* », James Blish imagine que le passage par l'univers subatomique permettra de voyager plus vite que la lumière et ainsi de conquérir l'espace. Dans cette nouvelle, même si l'électron reste une « planète » gravitant autour de son noyau-soleil, de curieux phénomènes de téléportation instantanée, de « champs télépathiques », de surfaces incertaines... sont constatés. Car en réalité, dans le monde scientifique des années 40-50, la représentation

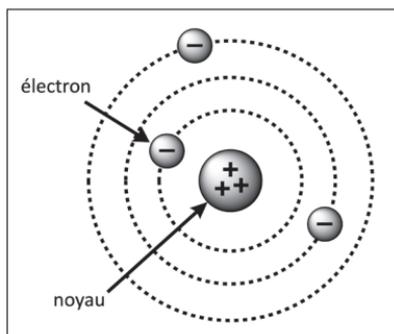


FIGURE 2. Modèle de Rutherford.

de l'atome a encore considérablement changé. Peu après l'expérience de Rutherford, des tentatives d'adaptation du modèle ont été effectuées⁽⁸⁾. Mais ce n'était pas suffisant ! Ce modèle a été rapidement abandonné, à partir de 1925, lors du développement de la mécanique quantique.

C'est quantique !

Quel est le problème de la représentation de Rutherford ? C'est que, justement, l'électron n'est pas une planète : c'est une particule électriquement chargée. Lorsque la Terre tourne autour du Soleil, la force d'attraction est la gravité. La force centrifuge produite par sa rotation compense exactement l'attraction du soleil : son orbite est en équilibre, et seuls les autres corps du système solaire (et d'ailleurs) peuvent produire des perturbations de cet équilibre. En dehors de ces perturbations, la Terre peut tourner indéfiniment autour du Soleil — tant qu'il y en a un.

En revanche, lorsqu'une particule chargée comme l'électron adopte un mouvement circulaire autour du noyau, la force d'attraction est de nature électromagnétique : l'électron chargé négativement est attiré par le noyau chargé positivement. En raison de sa charge électrique, sa trajectoire circulaire lui fait perdre de l'énergie, et l'électron, à force de rotations, devrait finir par tomber sur le noyau⁽⁹⁾. Comme ce n'est pas ce que l'on constate, c'est qu'il y a « quelque chose » qui empêche l'électron de tomber ! La mécanique quantique fait une proposition très contre-intuitive à ce sujet : elle suggère que la rotation d'un électron autour d'un noyau soit « quantifiée », c'est-à-dire que sa vitesse de rotation prenne des valeurs précises qui ne sont pas le fruit du hasard et de l'état initial. Ce qui fait que le système atomique est profondément différent d'un système planétaire.

Quelle est donc la représentation scientifique actuelle des atomes ? Elle varie en fonction de la discipline concernée. Un

physicien s'intéressant à la mécanique quantique et aux phénomènes nucléaires n'aura pas la même représentation qu'un chimiste se penchant sur le comportement des atomes dans leurs interactions avec leurs voisins. En effet, les phénomènes décrits par la mécanique quantique sont particulièrement contre-intuitifs : dualité onde-corpuscule, « principe d'incertitude » énoncé par Heisenberg (1901-1976), expérience de pensée du chat de Schrödinger... les exemples abondent. Pour le chimiste, en général, la représentation est simplifiée par rapport au modèle purement quantique : l'atome est constitué d'un noyau, autour duquel « tournent » des électrons. Mais la signification du mot « tourner » est en réalité plus abstraite que celle dans le modèle planétaire.

Ondes et particules

Le noyau, tout d'abord, est constitué de l'assemblage de deux types de particules : les protons et les neutrons. Les chimistes n'y prêtent généralement pas attention car les réactions chimiques, pour l'essentiel, ne concernent pas le noyau des atomes. Seuls les chimistes qui s'occupent de chimie nucléaire, branche de la discipline qui ressemble beaucoup à de la physique et qui s'intéresse aux phénomènes se produisant dans les centrales nucléaires ou les accélérateurs de particules, prendront la nature du noyau en compte dans leurs études.

Il nous suffira de savoir que ce noyau concentre 99,95 % de la masse atomique totale. La masse d'un proton est de $1,672 \times 10^{-27}$ kg, ce qui est évidemment minuscule : 1,6 milliardième de milliardième de milliardième de milliardième de gramme ! L'être humain a du mal à se représenter un nombre si petit. Pour s'en faire une idée, un tas comptant autant de protons qu'il y a d'étoiles dans l'univers (2×10^{23}) ne pèse que 0,3 gramme, soit environ le tiers de la masse d'un pétale de rose. Si la masse d'un neutron est à peu près la même que

celle d'un proton, il en diffère par sa charge électrique : les protons ont une charge positive, tandis que celle des neutrons est nulle. Le nombre de protons est un nombre entier, appelé « numéro atomique », caractéristique de l'élément atomique considéré (voir chapitre 3).

Autour du noyau, il y a les électrons. La nature d'un électron est très difficile à saisir intellectuellement : ce n'est pas un objet solide et compact puisque la mécanique quantique a montré qu'il se comporte à la fois comme une particule et une onde. Les chimistes utilisent indifféremment les deux notions, en fonction de leurs besoins. Sous sa représentation particulaire, un électron est insécable et quasi-punctuel, avec une masse environ 1 800 fois inférieure à celle d'un proton. Il a une charge électrique également, exactement opposée à celle d'un proton, négative donc. Il possède aussi une sorte de rotation sur lui-même que l'on nomme *spin* de l'électron. Sa représentation ondulatoire est en revanche un peu moins facile à saisir ⁽¹⁰⁾.

Les orbitales atomiques

En raison de la nature ondulatoire de l'électron, on ne peut lui attribuer à la fois une position et une vitesse précise. En revanche, on peut déterminer sa probabilité de présence dans l'espace entourant du noyau en fonction de son énergie. Le couple de ces deux données, énergie et distribution de probabilité spatiale, est appelé une « orbitale atomique ». Une orbitale atomique donnée sera caractérisée par son niveau d'énergie, qui est fixé par la mécanique quantique, et sa forme (symétrie, orientation dans l'espace) dépendant de son type. La zone de l'espace où l'électron peut se trouver adopte des formes très bizarres, en fonction de l'orbitale considérée : souvent sphérique, mais quelquefois fleur à quatre pétales, double larme ou anneau. D'autres encore ont des formes plus baroques, à quatre, six lobes toriques ou en double champignon... Ces zones de présence sont

imbriquées les unes dans les autres comme les pétales d'une rose⁽¹¹⁾. Un électron qui occupe une orbitale en double lobe peut se trouver à n'importe quel endroit du volume de cette orbitale. Il peut passer d'un lobe à l'autre instantanément, sans traverser le noyau. Ce n'est pas impossible, *c'est quantique* !

La Figure 3 montre la forme de quelques orbitales, le noyau atomique étant représenté par la petite sphère blanche au centre de chacune. Si ces orbitales se superposent, qu'est-ce qui empêche les électrons de se rencontrer, puisqu'ils occupent le même espace ? C'est entre autres à ce niveau qu'intervient la notion de « quantum d'énergie » de la théorie quantique.

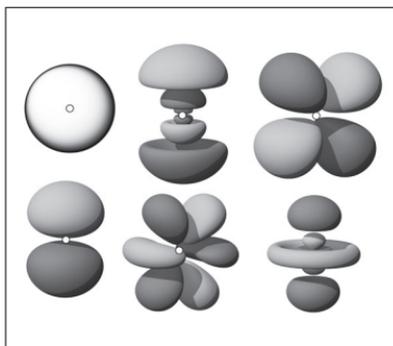


FIGURE 3. Quelques orbitales.

Contrairement à ce qu'implique le modèle du système planétaire, un électron occupe un « niveau d'énergie » qui n'est pas arbitraire : son énergie est *quantifiée* ! La liste des niveaux d'énergie est fixée par le nombre de protons et de neutrons que contient le noyau. Un électron occupant une orbitale est, sans interaction extérieure, condamné à y rester indéfiniment. Un électron d'une orbitale donnée ne croise jamais celui d'une autre orbitale... comme les voisins d'une copropriété parisienne : en réalité, les électrons se parlent, mais s'évitent. Une orbitale ne peut accueillir que deux électrons au maximum, s'ils sont de spin opposé⁽¹²⁾.

Peut-on voir l'invisible ?

Tout cela est bel et bon, mais peut-on « voir » les atomes ? La vision humaine fonctionne par l'interaction entre la lumière et une « protéine », la rhodopsine, située au niveau de la rétine,

comme cela sera largement expliqué au chapitre 4. Si un humain rapetisse au niveau atomique, sa protéine aussi... Elle ne peut alors plus interagir avec la lumière, et on ne peut plus rien voir. Ce point avait déjà été soulevé par Marc Wersinger, en 1947, avec *La Chute dans le néant*. Dans ce roman, le jeune ingénieur Robert Murier se découvre le pouvoir inexplicable de dissocier la matière de son corps à volonté. Cela lui permet de traverser les murs et de voyager rapidement. Il se rend malheureusement compte qu'au fur et à mesure qu'il utilise son pouvoir, sa propre matière s'amenuise. Incapable d'enrayer le processus, il devient de plus en plus petit, jusqu'à atteindre la taille des molécules. D'une manière curieuse, il peut « voir » alors les atomes constituant les molécules comme des sphères translucides qui voltigent en tous sens.

Comment notre pauvre ingénieur nanoscopeur arrive-t-il à les percevoir ? « *Les radiations qu'il enregistrait n'avaient qu'une parenté lointaine avec les rayons lumineux, qu'il ne pouvait plus percevoir depuis longtemps, et la surface de la molécule organique [qu'il était devenu] ne fonctionnait pas non plus comme un œil humain. [...] Il était évident qu'elle ne pouvait en aucune manière remplir la fonction complexe de l'organe de la vue. Elle était simplement impressionnée par un rayonnement. Ce dernier, d'une puissance constante, émanait des corpuscules atomiques, et il était normal que son action sur la molécule vivante ne variât pas, quelles que fussent les distances séparant ces corpuscules. En un mot, la matière organique traduisait par une surface ce qui n'était qu'une intensité.* »

La distance n'a peut-être pas d'influence, mais quelle est alors la nature du récepteur ? Robert Silverberg, dans sa nouvelle « *Chip Runner* » publiée en 1989, a essayé de répondre sur ce point. Dans cette nouvelle, un psychiatre doit traiter un adolescent qui souffre apparemment d'anorexie. En réalité, ce dernier est irrésistiblement attiré par le niveau subatomique, et veut simplement disparaître pour pénétrer dans

une puce électronique et partager la danse des électrons. Mais il n'est pas possible de voir les électrons, comme le dit très bien un physicien appelé à la rescousse par le psychiatre de l'histoire : « *Le mieux que nous puissions faire en guise d'examen est de "hasarder" une conjecture éclairée, une détermination probabiliste, de l'endroit où ils se trouvent et de la vitesse à laquelle ils se déplacent.* »

Cette nouvelle de Robert Silverberg est sans doute ce qui a été écrit de plus achevé sur l'éventualité de voyages dans les atomes en tenant compte le plus possible des concepts de la mécanique quantique et de leur impact. Le jeune homme anorexique décrit ainsi son périple dans la puce électronique : « *Il se trouve dans un étrange canyon dont les murs argentés, fendus par d'immenses crevasses, s'élèvent plus haut qu'il ne peut le voir. Il court. Il court. Il a une énergie infinie ; ses jambes se meuvent comme des pistons. Derrière lui, les portes s'ouvrent, se ferment, s'ouvrent et se referment. Des rivières au courant torrentiel arrivent en déferlant, le soulèvent, l'emportent. Il sent, mais ne voit pas, les vibrations des atomes de silicium ou de bore ; il sent, mais ne voit pas, les électrons et les non-électrons passant à flot, ruisselants vers les côtés, positifs ou négatifs, où ils sont inexorablement attirés.* » Notre explorateur veut aller encore plus loin, au niveau subatomique. Mais une barrière infranchissable l'empêche d'y accéder.

Le même type de barrière interdit aux protagonistes du film *Ant-Man* d'atteindre l'univers atomique. Dans ce film, sorti sur les écrans en 2015, celle que rencontre le héros en devenant de plus en plus petit est matérialisée par des images géométriques aux effets kaléidoscopiques. On n'est vraiment plus sur Terre, et on peut saluer l'effort des concepteurs du film, même si cette créativité ne s'est pas maintenue dans les suites *Ant-Man et la Guêpe* (2018), et *Ant-Man et la Guêpe : Quantumania* (2023) : dans ces deux suites, le héros peut accéder à ce monde subatomique qui, malheureusement pour

notre esprit scientifique, ressemble à s'y méprendre à une planète...

Cela signifie-t-il qu'on ne peut pas « voir » les atomes ? L'invention du microscope à effet tunnel en 1981 par Gerd Binnig (1947-) et Heinrich Rohrer (1933-2013), qui en ont été récompensés par le prix Nobel de physique en 1986, a changé la donne. C'est un microscope qui utilise un phénomène quantique, l'effet tunnel⁽¹³⁾, pour déterminer la morphologie et la densité électronique de surfaces conductrices ou semi-conductrices avec une précision spatiale pouvant être égale ou inférieure à la taille des atomes. Cette invention a ouvert la voie à toute une série de microscopes dits « à champ proche » ou « à sonde locale », comme le « microscope à force atomique », dédiés essentiellement à l'étude des propriétés de surface des échantillons. Ils sont caractérisés par l'absence de tout système de lentille optique ou électromagnétique. Leur principe consiste à positionner une sonde (généralement une pointe effilée) à une distance de la surface à étudier de l'ordre du nanomètre et à déterminer localement, point par point, la valeur d'une grandeur physique choisie (transfert d'électrons, flux de photons ou d'ions, topographie ou température). Grâce à ces nouveaux microscopes, on peut maintenant « prendre des photographies » d'objets de la taille d'une molécule et même d'un atome !

On le voit, les propriétés des objets quantiques sont tout à fait différentes de celles des objets dont nous avons l'habitude dans notre vie quotidienne. Une partie de pétanque quantique avec les électrons reste encore à écrire, même si Greg Egan s'est essayé avec bonheur à la description d'un match de football quantique dans une nouvelle qui a fait date, « *Gardes-frontières* ».

La plupart des scientifiques, chimistes ou physiciens, éprouvent des difficultés à appréhender la réalité concrète de la mécanique quantique. Ils se contentent, en général, de voir les électrons comme des particules diffuses qui « tournent »

autour du noyau, dans des orbitales définies par leur forme et leur niveau d'énergie. Cette énergie est également celle de l'électron-onde lorsqu'ils utilisent cette autre représentation. Cette approximation de la réalité suffit, la plupart du temps, à raisonner et à avancer.

- (1). Rûmi, Mawlana Djala Od-Din (1988).
- (2). Furlley, David, *Democrite*, In : Brunschwig, Jacques, Lloyd, Geoffrey E. R., Pellegrin, Pierre (2011).
- (3). Laks, André, *Epicure*, in : Brunschwig, Jacques, Lloyd, Geoffrey E. R., Pellegrin, Pierre (2011).
- (4). Lucrèce (2002).
- (5). Rûmi, Mawlana Djala Od-Din (2003).
- (6). Cette valeur avancée par Roman F. Starzl est très en-dessous de la réalité : un électron tourne bien plus vite, 10^{15} fois par seconde, soit mille millions de millions de tours par seconde.
- (7). Ernest Rutherford met en évidence les rayonnements alpha (constitués d'ions hélium ${}^4\text{He}^{2+}$) et beta (constitués d'électrons ou de positons) émis par l'uranium en 1899 et la désintégration radioactive du thorium en 1901.
- (8). En particulier par Niels Bohr (1885-1962), prix Nobel de physique en 1922, qui a proposé un modèle amélioré, dit « modèle de Bohr », qui permettait d'expliquer la nature discontinue du spectre lumineux des éléments chimiques, et commençait à introduire déjà la notion de quantification des niveaux d'énergie.
- (9). Le mouvement de l'électron autour du noyau génère un champ électromagnétique, nommé rayonnement synchrotron. Ce phénomène n'existe pas pour une planète en rotation autour du Soleil car elle est dépourvue de charge électrique. En revanche, son mouvement est source d'ondes gravitationnelles, mais cet effet est négligeable pour des systèmes classiques, comme le couple Soleil-Terre. Il est en revanche mesurable pour un couple d'étoile à neutrons, et a été mesuré en 1993 dans un pulsar binaire. Dans le cas de l'électron, le rayonnement synchrotron doit lui faire perdre de l'énergie et, à force de rotations, il doit donc finir par tomber sur le noyau. Le calcul montre que la durée de chute de l'unique électron d'un atome d'hydrogène (le plus simple et le plus répandu des éléments) est de l'ordre du milliardième de seconde... ce qui n'est manifestement pas le cas !

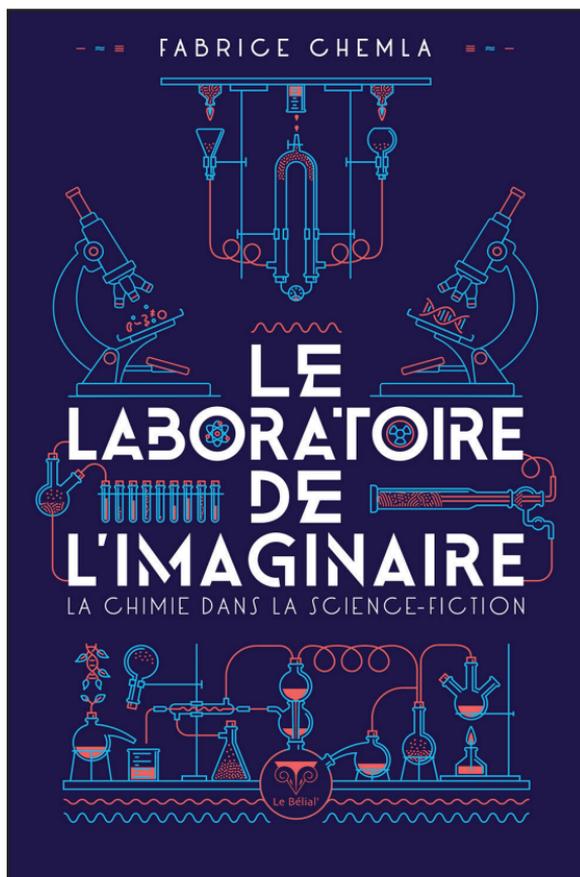
(10). Il s'agit de la « fluctuation diffuse d'une onde stationnaire ». Un électron peut être décrit par une fonction mathématique qui porte le nom de « fonction d'onde », que les chimistes préfèrent appeler « orbitale ».

(11). En réalité, l'électron est, d'une manière diffuse, *intégralement* dans cette zone d'espace autour du noyau. La représentation d'une orbitale montre la probabilité de trouver l'électron ici ou là si une mesure est effectuée.

(12). On appelle cette loi le « principe d'exclusion », proposé par Wolfgang Pauli (1900-1958), qui leur interdit d'avoir la même position, la même vitesse, la même énergie et le même sens de rotation au même moment.

(13). « L'effet tunnel » désigne la capacité que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière. C'est un effet purement quantique, qui ne peut pas s'expliquer par la mécanique classique.

**Retrouvez la suite
dans *Le Laboratoire
de l'imaginaire***



En librairie le 17 octobre!