La langue graphique en physique quantique

À la recherche d’une complémentarité

2022 – 2023

Emma Martin

DNSEP Design
Mention Design
graphique Multimédia

École supérieure
d’art & de design
des Pyrénées

Pôle Image, Édition
et Dessin de caractères

ÉSAD·PYRÉNÉES

2 0.0 – Des ambitions

2 1.0 – Introduction : l'expertise
2 1.0.1 – Une histoire de vocabulaire
3 1.0.2 – L'isolation de la science
3 1.0.3 – La vision doxique des images en mathématique
4 1.0.4 – Les physiciens ne comprennent plus la physique

5 1.1 – Introduction : les mathématiques
5 1.1.1 – De l'axiome à la théorie
5 1.1.2 – Le lien physico-mathématique

6 2.0 – Introduction : les études de cas

7 2.1 – Les formes réalisées par les scientifiques
7 2.1.1 – Diagramme de Feynman
8 2.1.2 – Réseaux de spins
9 2.1.3 – Calabi-Yau
11 2.1.4 – Orbitales atomiques

13 2.2 – Les formes observées par les scientifiques
13 2.2.1 – Particules dans une chambre à bulles
14 2.2.2 – Les condensats de Bose-Einstein
16 2.2.3 – La microscopie à effet tunnel
17 2.2.4 – Intrication quantique

18 3.0 – Les formes réalisées par les vulgarisateurs
19 3.1 – Reprise des formes scientifiques
20 3.2 – Formes métaphoriques et analogiques
22 3.3 – Manuels et codes visuels scolaires
24 3.4 – Magazines scientifiques

26 4.0 – Les formes réalisées par les designers
26 4.1 – Pédagogie par analogies
29 4.2 – Complémentarité visuelle
31 4.3 – Personnifier des atomes
32 4.4 – Concrétiser les échelles

34 5.0 – Conclusion

0.0 – Des ambitions

N'avez-vous pas la curiosité de comprendre et de connaître le monde qui vous entoure ? Cette soif de connaissance est, selon moi, le dessein de l'humanité. Le savoir est s'accroît comme un immense rhizome continuel. J'ai l'ambition de le diffuser, de le partager afin de l'élever toujours plus haut. Plus un savoir est repandu, plus il est à même d'être acquis. Plus nos savoirs acquis sont nombreux, plus l'assimilation de nouveaux sont possibles. Chercher à tout connaître est évidemment impossible. Néanmoins, si nous partageons cette ambition utopique, alors le rhizome s'immensifie et en ce cas, il s'immensifiera d'autant plus demain jusqu'à devenir illimité. Maintenant, pourquoi avoir choisi, parmi tout le savoir,
le domaine de la physique quantique et les outils mathématiques ? Pour la raison suivante : bien que le terme quantique ait pris de la popularité, bons nombres sont ceux qui ne s'y intéressent pas dû à l'incompréhension et une vision doxique (voir glossaire), d'autant plus pour les outils mathématiques. Je souhaite corriger cela, et pas uniquement céans, mais aussi durant ma vie professionnelle grâce à de multiples projets.

1.0 – Introduction : l'expertise

1.0.1 – Une histoire de vocabulaire

La langue graphique et la physique quantique. Pourquoi s'orienter vers le terme *langue* alors que nous pourrions plutôt utiliser *langage* dans ce contexte ?
Si nous prenons les définitions exactes, nous obtenons pour le premier terme :

> *« Système de signes vocaux et/ou graphiques, conventionnels, utilisé par un groupe d'individus pour l'expression du mental et la communication »* ***[1]*** .

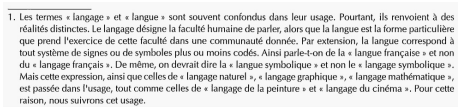
et pour le deuxième :

> *« Faculté que les hommes possèdent d'exprimer leur pensée et de communiquer entre eux au moyen d'un système de signes conventionnels vocaux et/ou graphiques constituant une langue »* ***[2]*** .

Nous comprenons ici que la langue est un système de signes alors que le langage en est la faculté d'utilisation. Toutefois, nos usages nous orientent différemment en parlant, par exemple, de langage graphique au lieu de langue graphique **[a]**. Ainsi, nous utiliserons le terme langue, fidèlement aux définitions précédentes.

Par la suite, comprenons que le langage scientifique est constitué de trois langues : naturelle, symbolique et graphique, d'après la préface de l'ouvrage *Intervenir sur les langages en mathématiques et en sciences* **[3]** .
Prenons un exemple d'application : {$E=mc^2$} est une formule appartenant à la langue symbolique. Sa traduction en langue naturelle est {l'énergie est égale à la masse multipliée par la célérité au carré}. La langue graphique serait, dans ce cas, un schéma ou une forme traduisant visuellement la formule.

[a]



1. Les termes « langage » et « langue » sont souvent confondus dans leur usage. Pourtant, ils renvoient à des réalités distinctes. Le langage désigne la faculté humaine de parler, alors que la langue est la forme particulière que prend l'exercice de cette faculté dans une communauté donnée. Par extension, la langue correspond à tout système de signes ou de symboles plus ou moins codés. Ainsi parle-t-on de la « langue française » et non du « langage français ». De même, on devrait dire la « langue symbolique » et non le « langage symbolique ». Mais cette expression, ainsi que celles de « langage naturel », « langage graphique », « langage mathématique », est passée dans l'usage, tout comme celles de « langage de la peinture » et « langage du cinéma ». Pour cette raison, nous suivrons cet usage.

↑ « Les termes ‹ langage › et ‹ langue › sont souvent confondus dans leur usage. Pourtant, ils renvoient à des réalités distinctes. Le langage désigne la faculté humaine de parler, alors que la langue est la forme particulière que prend l'exercice de cette faculté dans une communauté donnée. Par extension, la langue correspond à tout système de signes ou de symboles plus ou moins codés. Ainsi parle-t-on de la ‹ langue française › et non du ‹ langage français ›. De même, on devrait dire la ‹ langue symbolique › et non le ‹ langage symbolique ›. Mais cette expression, ainsi que celles de ‹ langage naturel ›, ‹ langage graphique ›, ‹ langage mathématique ›, est passée dans l'usage, tout comme celles de ‹ langage de la peinture › et ‹ langage du cinéma ›. », *Intervenir sur les langages en mathématiques et en sciences*, Belanger Marco et Riopel Martin, retranscription d'une note de bas de page dans l'introduction à la page XIV, 2007. **Note : Ici, il est affirmé que nos usages modifient notre vocabulaire à défaut des définitions rédigées ci-contre.**

[1] Définition d'après CNRTL (Centre national de ressources textuelles et lexicales), repéré à *https://www.cnrtl.fr/definition/langue*[consulté le 19 octobre 2022]
[2] *Ibid.*, repéré à *https://www.cnrtl.fr/definition/langage* [consulté le 19 octobre 2022]
[3] Belanger Marco et Riopel Martin, *Intervenir sur les langages en mathématiques et en sciences*, *Modulo*, août 2007

1.0.2 – L'isolation de la science

Jean-Marc Lévy-Leblond a beaucoup écrit notamment sur la physique quantique et son écart vis-à-vis de la vision populaire. Dans son ouvrage *La science en mal de culture* **[4]** , il atteste du hiatus entre le savoir scientifique et le savoir populaire. Celui-ci isole la science ce qui les contraignent l'un l'autre. Également dans la Préface du livre *À la découverte des lois de l'univers* **[5]** , Roger Penrose, éminent cosmologiste et mathématiciens, pense qu'il s'agit d'un mauvais départ dans l'éducation de la science, d'autant plus pour les mathématiques. D'après lui, nombre de personnes se pensent incapables de résoudre une multiplication de fraction. Pourtant, il n'est pas exclu qu'ils le puissent. En soit, si l'éducation est forcée, sans passion ou effectuée sans démontrer l'intérêt d'une discipline, alors l'élève ne suit pas et n'a pas envie de suivre : il n'y est pas encouragé. Ainsi, dès le plus jeune âge, une personne se retrouve à isoler la science de sa culture. Néanmoins, nous verrons que cette isolation n'est pas unilatérale.

1.0.3 – La vision doxique des images en mathématique

Que pensent les experts en sciences dites « dures » **[6]** de la langue graphique ? Ici, nous avons des témoignages de mathématiciens regroupés dans un article de Muriel Lefebvre « L'ambivalence des mathématiciens face à l'image » **[7]** .
À la lecture, nous remarquons en premier lieu que certains experts voient l'image comme un élément superflu ou inutile :

> *« Dans mes articles, je ne dessine pas car tout le monde connaît. Ce n'est pas la peine. »* ***[8]*** .
> *« C'est des dessins destinés aux manuels. Ça ne sert pas à grand-chose. Ce sont vraiment des dessins pour des ignorants ! »* ***[9]*** .

Pour ces mathématiciens, l'image n'a qu'une utilité pédagogique destinée au profane — un facteur attestant que la science s'isole elle-même du populaire.

En second lieu, nous comprenons que l'image possède une mauvaise réputation, car elle ne serait pas un contenu scientifique, comme le témoigne un expert :

> *« Le vrai problème de l'utilisation des dessins en mathématiques, c'est que c'est extrêmement mal vu. Il y a évidemment des changements en mathématiques. Mais encore, c'est presque impossible d'imaginer un texte où des dessins font une partie des démonstrations. [...] Il y a un préjugé. »* ***[10]*** .
> *« D'après un mathématicien, ‹ le contenu scientifique, c'est ce qui reste quand on a supprimé les images... ›. Insérer une figure dans un texte serait contraire à la démarche scientifique. »* ***[11]*** .

[4] Lévy-Leblond Jean-Marc, *La science en mal de culture*, *Futuribles*, novembre 2004
[5] Penrose Roger, *À la découverte des lois de l'univers : La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, préface, Odile Jacob, Paris, 2007
[6] Ici, il n'est pas question de sciences humaines, mais de sciences naturelles. De ce fait, le mot « science » sera compris comme étant science naturelle durant la lecture de l'écrit.
[7] Lefebvre Muriel, « L'ambivalence des mathématiciens face à l'image », *Communication & langages*, *HAL*, 2003, page 136, repéré à *https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic_00001392 /document* [consulté le 21 octobre 2022]
[8] *Ibid.*, page 17
[9] *Ibid.*
[10] *Ibid.*
[11] *Ibid.*, page 18

En troisième lieu, les experts rejettent de la rédaction les démonstrations formelles au motif qu'elle ne pourrait pas constituer un moyen de preuve comme le précise ces témoignages :

> *« Bon, de toute façon, il est clair qu'on ne fait pas de démonstration en faisant... Je veux dire, les démonstrations formelles... et validables, en faisant un dessin. Un dessin, on ne l'utilise que comme une aide, au texte, à la compréhension du texte qui est à côté. »* ***[12]*** .
> *« Je pense qu'une preuve doit être une preuve. Moi j'aime beaucoup les dessins, mais il y a des choses avec lesquelles on ne peut pas plaisanter. »* ***[13]*** .

Toutefois, nous constatons également l'ambivalence de certains discours. Jusqu'à maintenant, nous n'avons pu apercevoir qu'une vision doxique (voir glossaire). Malgré tout, des mathématiciens possèdent une toute autre opinion :

> *« Il m'arrive souvent, bien sûr, quand je réfléchis, de faire des dessins sur le papier, qui sont des vues en perspective de surfaces, disons... Et qui me servent de support, en quelque sorte, à la réflexion. »* ***[14]*** .
> *« Là, ça n'avait pas de sens sans dessin [...] C'est inhérent au sujet. [...] Comment vous voulez que je raconte ça autrement qu'en montrant les figures ? Ça n'avait pas de sens s'il n'y avait pas de dessins. »* ***[15]*** .
> *« C'est comme ça qu'on travaille. Ces dessins font partie d'une démonstration. Même si c'est mal vu par la communauté. »* ***[16]*** .

La langue graphique a beau avoir mauvaise réputation, elle garde une utilité didactique et devient, en outre, un support tangible à la réflexion.

1.0.4 – Les physiciens ne comprennent plus la physique

> *« La physique devient trop difficile pour les physiciens »* ***[17]*** .

Maintenant que nous connaissons les fossés réciproques entre science et populaire grâce à Jean-Marc Lévy-Leblond, nous retrouvons dans son ouvrage un passage intéressant ; à savoir que dans la science, il y a une sur-isolation. Présentement, il se trouve une ultra-spécialisation de la recherche. De ce fait, un scientifique, de même discipline, peut se retrouver non-expert d'un sujet de recherche ultra-spécialisé, ce qui l'isole. Comme nous démontre l'interview d'Anna Alter **[18]** , astrophysicienne et journaliste scientifique, les physiciens ne connaissent pas toutes les théories de leur propre domaine :

> *« les chercheurs inventent aujourd'hui des outils mathématiques — théories des pliages et des nœuds, cordes, groupes, topologie, etc. — tellement abstraits et complexes qu'ils ne sont accessibles qu'à*

[12] Lefebvre Muriel, *op. cit.*, page 19
[13] *Ibid.*
[14] *Ibid.*, page 21
[15] *Ibid.*, page 22
[16] *Ibid.*, page 23
[17] Citation de Hilbert David, interprété par M. Madrid Casado Carlos, « Axiomatiser la physique », dans *Hilbert et les bases des mathématiques, au début était l'axiome*, RBA France, 2015, collection : Grandes idées de la science, page 75
[18] Alter Anna, « Le plus grand paradoxe de l'astronomie est désormais dépassé », *Atlantico*, novembre 2020, repéré à *https://atlantico.fr/article/decryptage/le-plus-grand-paradoxe-de-l-astronomie-est-desormais-depasse-galaxie-espace-trous-noirs-recherche-etude-scientifique-anna-alter* [consulté le 16 décembre 2022]

une poignée d'experts à travers le monde qui n'arrivent pas à se mettre d'accord et nous on a du mal à suivre ».

1.1 – Introduction : les mathématiques

1.1.1 – De l'axiome à la théorie

Afin de consolider notre vocabulaire sur les mathématiques, demandons-nous : qu'est-ce qu'une théorie ? Profondément ancré dans nos usages, voilà bien un mot qui dépasse l'isolement de la science. Carlos M. Madrid Casado nous explique, dans son livre *Hilbert et les bases des mathématiques, au début était l'axiome*, une nouvelle perspective explicative suivant l'interprétation de David Hilbert ; un des plus grands mathématiciens du XX^{e} siècle. Cette perspective se fonde autour de l'axiome : un énoncé ou principe fondamental d'une théorie. Afin de le consolider, il convient d'effectuer une démonstration, cette dernière étant une suite de déduction logique ; cela créer le théorème, le résultat final de la démonstration. En définitive, la théorie est l'ensemble des théorèmes démontrables. En plus de mieux saisir les mathématiques, nous comprendrons alors, par la suite, son lien avec la physique.

1.1.2 – Le lien physico-mathématique

« Pourtant, les équations ne sont pas juste des jeux d'écriture mathématique, ce sont souvent elles qui permettent aux physiciens de penser le concept, de le triturer, de le manipuler, de l'éprouver et finalement de le comprendre. » ***[19]*** .

« La philosophie est écrite dans ce livre gigantesque qui est continuellement ouvert à nos yeux (je parle de l'Univers), mais on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langage mathématique, et les caractères sont des triangles, des cercles, et d'autres figures géométriques, sans lesquelles il est impossible d'y comprendre un mot. » ***[20]*** .

Les mathématiques sont une langue universelle qui permet de traduire des phénomènes physiques en symboles synthétiques. Ainsi, il est aisé d'apercevoir ce lien fluctuant entre mathématique et physique ; notamment, quand nous lisons des publications scientifiques avec plus d'équations que de texte — ce qui a tendance à nous rebuter. Néanmoins, nous comprendrons davantage ce lien avec son histoire. Dans le diaporama de la conférence *Mathématiques et Physique.*
Le langage de la Nature est-il mathématique ? de Didier Robert **[21]** , il est précisé qu'à partir de l'antiquité, la formulation des lois physiques demandait des formulations mathématiques constamment plus complexes.

[19] Bobroff Julien, « La cinquante-deuxième lettre », dans *La quantique autrement*, Flammarion, Villeneuve-d'Ascq, 2020, page 29
[20] Galilée, L'Essayeur, 1623, traduit par Jean-Marc LÉVY-LEBLOND, « SYMBOLISATION, physique », *Encyclopædia Universalis*, repéré à *https://www.universalis.fr/encyclopedie/symbolisation-physique/* [consulté le 13 novembre 2022]
[21] Robert Didier, « Mathématiques et Physique. Le langage de la Nature est-il mathématique ? », *Laboratoire de mathématiques Jean Leray, Université de Nantes*, 2015, repéré à *https://www.math.sciences.univ-nantes.fr/~robert/conf_upn_07.pdf* [consulté le 8 décembre 2022]

Prenons l'exemple de Pythagore : imaginons que nous avons un carré aux côtés mesurant un centimètre chacun. Comment mesurer sa diagonale ? Si nous suivons son théorème, nous savons que la diagonale est la racine de la somme de deux côtés — soit 1+1 = 2 et donc √2. Toutefois, à cette époque, nous ne connaissions pas la racine √. De ce fait, il a fallu inventer des nombres substituts, soit √ 2 ≈ 1, 414 · · ·.

Postérieurement, Archimède dut inventer un nombre d'autant plus mystérieux que nous connaissons tous aujourd'hui : π (≈ 3, 14159 · · ·). π est fréquemment utilisé en physique quantique. Nous pouvons citer la constante de Dirac
(un remaniement de la constante de Planck) — formule mère dans cette discipline — qui se note ħ = h/2π. Nous constatons que les mathématiques sont une langue essentielle en physique. Cela complète également le premier propos énoncé dans l'introduction sur les trois langues que nous retrouvons dans le langage scientifique. Par ailleurs, d'après le professeur Bruno Mendiboure **[22]** , les mathématiques utilisées en physique sont nommées outils mathématiques ; c'est donc ainsi que nous les mentionnerons.

2.0 – Introduction : les études de cas

> *« Cette théorie [la physique quantique] est subtile. Elle s'exprime avec un ensemble simple d'axiomes, et c'est une théorie qui « marche » parfaitement ! Cependant, elle a provoqué un tel bouleversement conceptuel de notre appréhension du réel physique que l'on ne sait pas encore l'énoncer avec le langage courant. On ne sait l'exprimer correctement qu'avec le langage mathématique. Connaître et assimiler le sens de ses structures mathématiques est le prix d'entrée au cercle du petit nombre de ceux qui peuvent la comprendre, même si, au bout du compte, l'essentiel de ces mathématiques est relativement simple. [...] mais il est difficile sinon impossible de verbaliser correctement, même en définissant des mots nouveaux, comme le font souvent les philosophes. »* ***[23]***

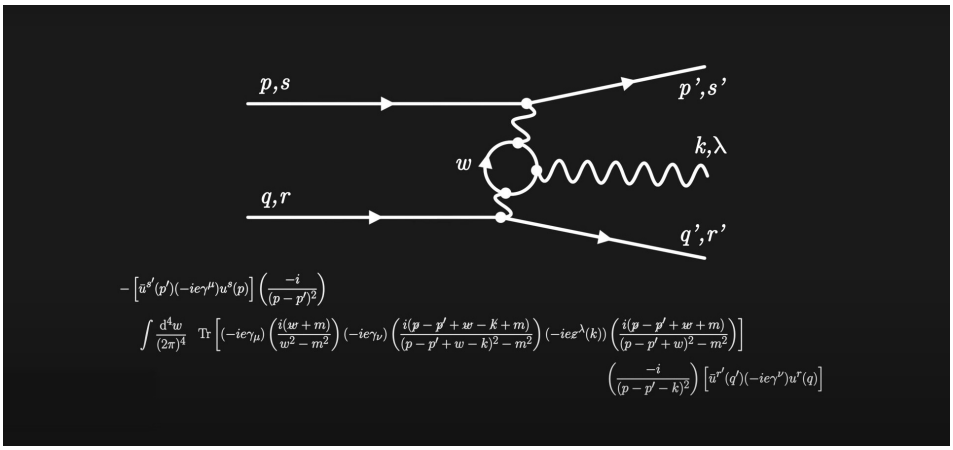
Aujourd'hui, le problème est que la physique quantique ne peut être exprimée que part des outils mathématiques. Donc, en quoi la langue graphique complémentarise les outils mathématiques en physique quantique ? Et en quoi le design graphique peut s'y introduire et résoudre son indicibilité ? Parmi nombre d'outils mathématiques formulés en langue symbolique, certains peuvent être traduit en langue graphique. Nous verrons, dans une première étude de cas, des utilisations de formes créées et utilisées par des experts physiciens ou mathématiciens. Celle-ci est dissociée en deux parties, la seconde étant les observations concrètes. La deuxième étude de cas nous montrera les formes créées et utilisées par les médiateurs/vulgarisateurs. En définitive, la dernière étude de cas développera les formes créées et utilisées par les designers graphiques. Il est important de noter que chaque étude de cas comportera quatre axes, chacun étant représenté par un exemple, afin d'appréhender au mieux le propos.

[22] Voir en fin d'écrit l'entretien de Bruno Mendiboure, professeur de physique à L'UPPA (Université de Pau et des Pays de l'Adour).
[23] Basdevant Jean-Louis, « La physique et le langage », dans *15 leçons de mécanique quantique*, Deboeck supérieur, 2019, page 7

2.1 – Les formes réalisées par les scientifiques

Nous voici dans notre première étude autour des formes créées et utilisées par des physiciens et/ou mathématiciens. Antérieurement, nous avons étudié la vision doxique d'experts scientifiques sur l'image. Cette vision diverge en fonction des témoignages, mais toutes s'accordent sur la valeur pédagogique des images. À partir d'ici, les formes seront évaluées dans cet objectif aux valeurs quantifiables telles que l'efficacité, la lisibilité et l'attrait.

2.1.1 – Diagramme de Feynman



↑ *Électrodynamique quantique et Diagrammes de Feynman*, ScienceClic, vidéo *Youtube*, février 2021, capture d'écran à 9:12

Commençons avec les diagrammes de Feynman. Ces derniers sont apparus au milieu du XX^{e} siècle par Richard Feynman, illustre physicien. Leurs objectifs sont de montrer précisément (à 0, 000 1 % près) les interactions entre les particules comme les électrons ou les photons — particules de la lumière. Ils témoignent également d'une démonstration temporelle : les flèches représentent le déplacement de la particule dans le temps. À savoir qu'un électron se déplaçant vers le passé ne possède pas la même charge électrique et, de ce fait, il devient son contraire positif : un positon. Les diagrammes de Feynman possèdent de plus une ondulation pour représenter un photon. En plus de montrer les interactions, nous pouvons constater leurs évolutions. Un électron ou un positon peut absorber ou émettre un photon à partir d'un point d'interaction. Plusieurs possibilités nous sont accordées : un électron et un positon peuvent s'annihiler en photon comme ce dernier peut se convertir en une paire électron/positon. Les points d'interactions constituent un changement qui peut faire rapprocher ou s'éloigner les particules (ou antiparticule pour le positon).

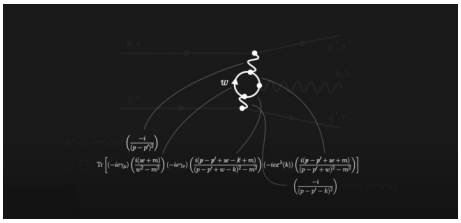
Nombre de scénarios sont alors imaginables : nous pouvons, par exemple, faire émettre un photon qui se convertirait en paire électron/positon pour ensuite s'annihiler en photon avant de rejoindre l'autre point d'interaction — ce que nous appelons une boucle, nous pouvons l'observer ci-contre.

> *« A priori, tant que le mouvement global et la charge électrique sont conservés, tous les scénarios imaginables, une infinité de possibilités plus ou moins complexes sont susceptibles de se produire. »* ***[24]*** .

[24] ScienceClic, « Électrodynamique quantique et Diagrammes de Feynman », *Youtube*, février 2021, 7:45, repéré à https://www.youtube.com/watch?v=5QQHwyzwxyE&t=795s [consulté le 18 décembre 2022]

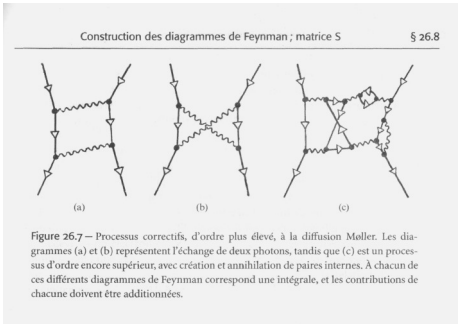
Chaque scénario peut être représenté par un diagramme, soit une infinité. Toutefois, quel est le scénario qui se produit dans l'univers ?
En sachant qu'à l'échelle quantique, les particules sont partout à la fois et en même temps, leurs états se superposent : ce qu'on nomme une superposition d'états. Dû à cette caractéristique, tous les scénarios se produisent en même temps. Chaque scénario correspond à une équation **[b] [c]**, celui-ci y est alors complémentaire. Comme nous pouvons le voir dans l'exemple choisi, les diagrammes sont des schémas stylisés et simples permettant une grande efficacité dans la communication, qu'elle soit inter-expert ou entre expert et profane.

[b]



↑ « Électrodynamique quantique et Diagrammes de Feynman », ScienceClic, vidéo *Youtube*, février 2021, capture d'écran à 9:20

[c]

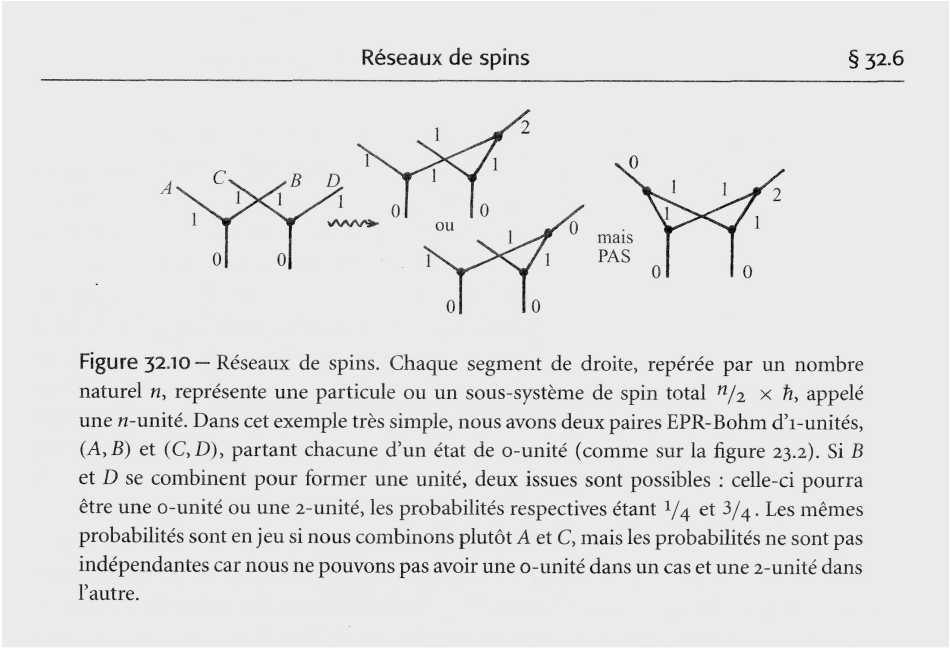


↑ **« À chacun de ces différents diagrammes de Feynman correspond une intégrale, et les contributions de chacune doivent être additionnées. »** Extrait de l'ouvrage *À la découverte des lois de l'univers : La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Roger Penrose, scan de la page 913, 2007

2.1.2 – Réseaux de spins

D'autres diagrammes sont également omniprésents en physique et ont participé à plusieurs avancées majeures.

> *« Des réseaux tensoriels aux circuits quantiques en passant par les diagrammes de Feynman, rares sont les domaines de la physique qui ne font pas appel à un raisonnement informel par l'image. Ces diagrammes représentent les opérations mathématiques sous-jacentes et facilitent l'interprétation physique, mais ne peuvent généralement pas être calculés directement. » **[25]** .*



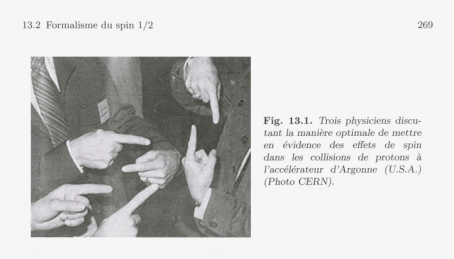
↑ Extrait de l'ouvrage *À la découverte des lois de l'univers : La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Roger Penrose, scan de la page 920, 2007

Celui que nous étudierons dans cet axe est le réseau de spins créé par Roger Penrose. Notamment connu pour ses collaborations avec Stephen Hawking, il a également inventé la théorie quantique des twisteurs et reçu le prix Nobel de physique en 2020. Vers le milieu du XX^{e} siècle, il invente les réseaux de spins, un schéma représentant les relations entre spins. Maintenant, nous nous posons tous la même question : qu'est-ce qu'un spin ? Si nous consultons notre ressource écrite par Penrose, nous avons :

[25] East Richard, « Physique formelle de spin diagrammatique », *HAL*, 2022, repéré à *https://theses.hal.science/tel-03719945* [consulté le 11 janvier 2023]

> *« Dans le cas d'une particule massive, le spin désigne le moment angulaire autour du centre de la masse. »* ***[26]*** .

[d]



13.2 Formalisme du spin 1/2 269

Fig. 13.1. *Trois physiciens discutant la manière optimale de mettre en évidence des effets de spin dans les collisions de protons à l'accélérateur d'Argonne (U.S.A.) (Photo CERN).*

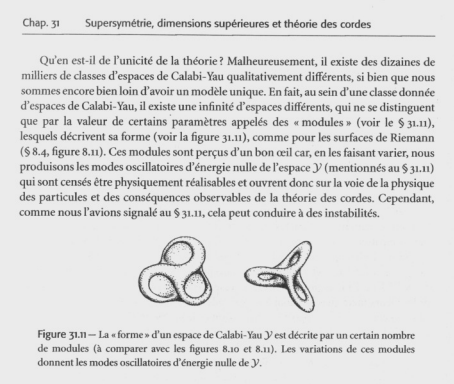
↑ Extrait de l'ouvrage *15 leçons de mécanique quantique*, Jean-Louis Basdevant, scan à la page 269, 2019

Peu parlant, toutefois, si nous regardons le choix des mots, il peut être aisé d'y trouver un sens. Il faut savoir qu'un moment angulaire, aussi appelé moment cinétique, est une grandeur qui décrit la rotation d'un corps. Qui plus est, spin signifie tourner en français. Nous comprenons que le spin est donc une propriété qui est à l'origine du mouvement de rotation d'une particule ayant une masse — le spin d'un photon, une particule n'ayant pas de masse, n'est présent que dans sa direction **[d]**.

Présentement, voyons le réseau de spins :

> *« Chaque segment de droite, repéré par un nombre naturel n, représente une particule ou un sous-système de spin total* $^{n}/_{2}$ *x* $\hbar$*, appelé une n-unité. »* ***[27]*** .

[e]



Chap. 31 Supersymétrie, dimensions supérieures et théorie des cordes

Qu'en est-il de l'unicité de la théorie ? Malheureusement, il existe des dizaines de milliers de classes d'espaces de Calabi-Yau qualitativement différents, si bien que nous sommes encore bien loin d'avoir un modèle unique. En fait, au sein d'une classe donnée d'espaces de Calabi-Yau, il existe une infinité d'espaces différents, qui ne se distinguent que par la valeur de certains paramètres appelés des « modules » (voir le § 31.11), lesquels décrivent sa forme (voir la figure 31.11), comme pour les surfaces de Riemann (§ 8.4, figure 8.11). Ces modules sont perçus d'un bon œil car, en les faisant varier, nous produisons les modes oscillatoires d'énergie nulle de l'espace $\mathcal{Y}$ (mentionnés au § 31.11) qui sont censés être physiquement réalisables et ouvrent donc sur la voie de la physique des particules et des conséquences observables de la théorie des cordes. Cependant, comme nous l'avions signalé au § 31.11, cela peut conduire à des instabilités.

Figure 31.11 — La « forme » d'un espace de Calabi-Yau $\mathcal{Y}$ est décrite par un certain nombre de modules (à comparer avec les figures 8.10 et 8.11). Les variations de ces modules donnent les modes oscillatoires d'énergie nulle de $\mathcal{Y}$.

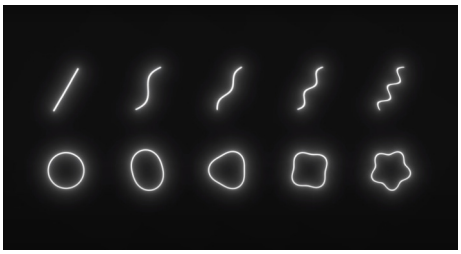
↑ Extrait de l'ouvrage *À la découverte des lois de l'univers : La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Roger Penrose, scan de la page 878, 2007

Le spin total est une mesure de la quantité de spins formant un ensemble. Ici, nous considérons qu'une unité est une particule où n serait la valeur du spin total (un spin peut avoir plusieurs valeurs en fonction de sa particule : 0 ; 1/2 ; 1 ; 2). Aujourd'hui, les réseaux de spins sont surtout utilisés dans le cadre de la gravitation quantique à boucle qui, comme la théorie des supercordes [voir 2.1.3], cherche à unifier la gravité à l'échelle quantique. Tout comme ceux de Feynman, ils sont des diagrammes stylisés, qui nécessitent peu de communication dû à leur efficience visuelle.

2.1.3 – Calabi-Yau

Malgré de nombreux diagrammes et tableaux, la physique quantique ne se limite pas à des modèles aussi schématiques. Une des formes les plus complexes est celle des Calabi-Yau, comme nous pouvons le constater avec les images ci-dessous **[28]** et ci-contre **[e]**. Ils ont été notamment utilisés dans la théorie des supercordes. Toutefois, de quelle théorie s'agit-il ?

[f]



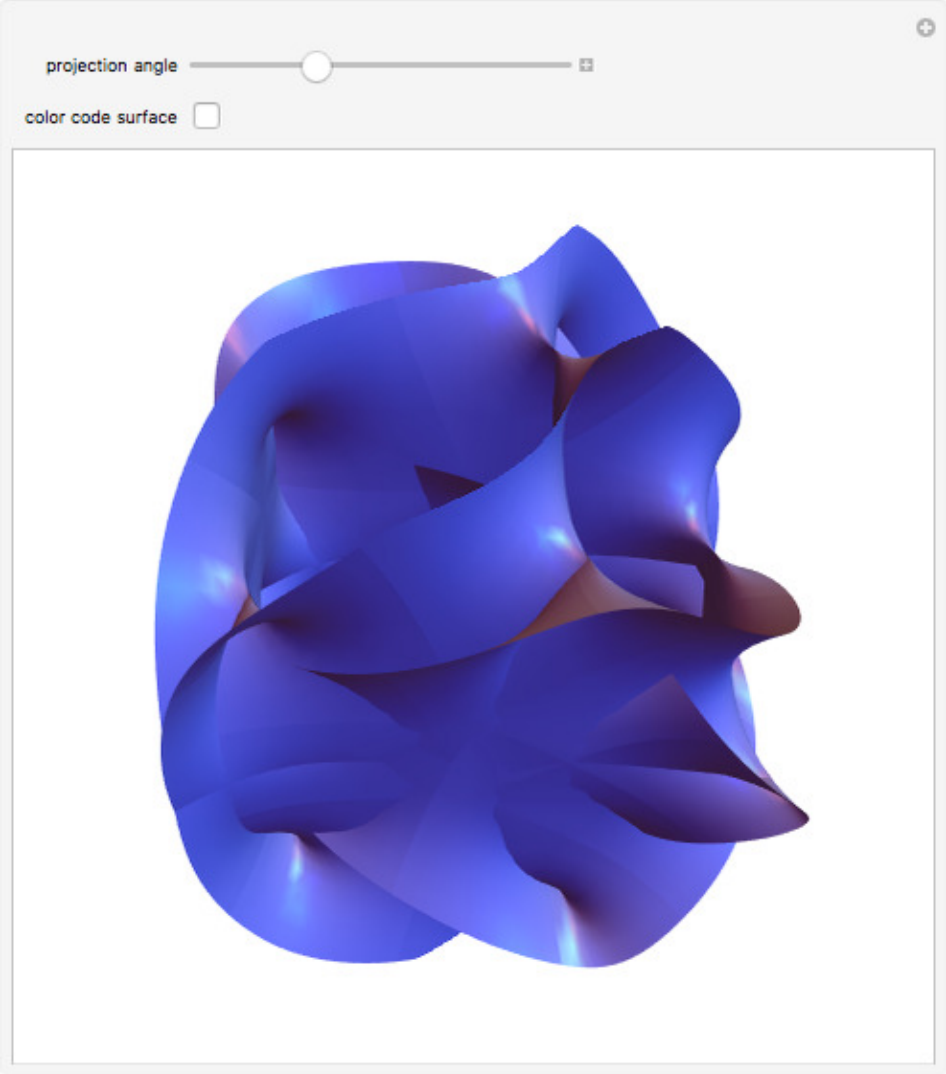
↑ « La théorie des Cordes », ScienceClic, vidéo *Youtube*, capture d'écran à 3:22, juillet 2021, repéré à *https://www.youtube.com/watch?v=f0e-Soo1qFQ* [consulté le 19 décembre 2022] **Note : Les cordes fermées, contrairement aux ouvertes, forment une boucle tel un cercle qui aura différentes vibrations possibles.**

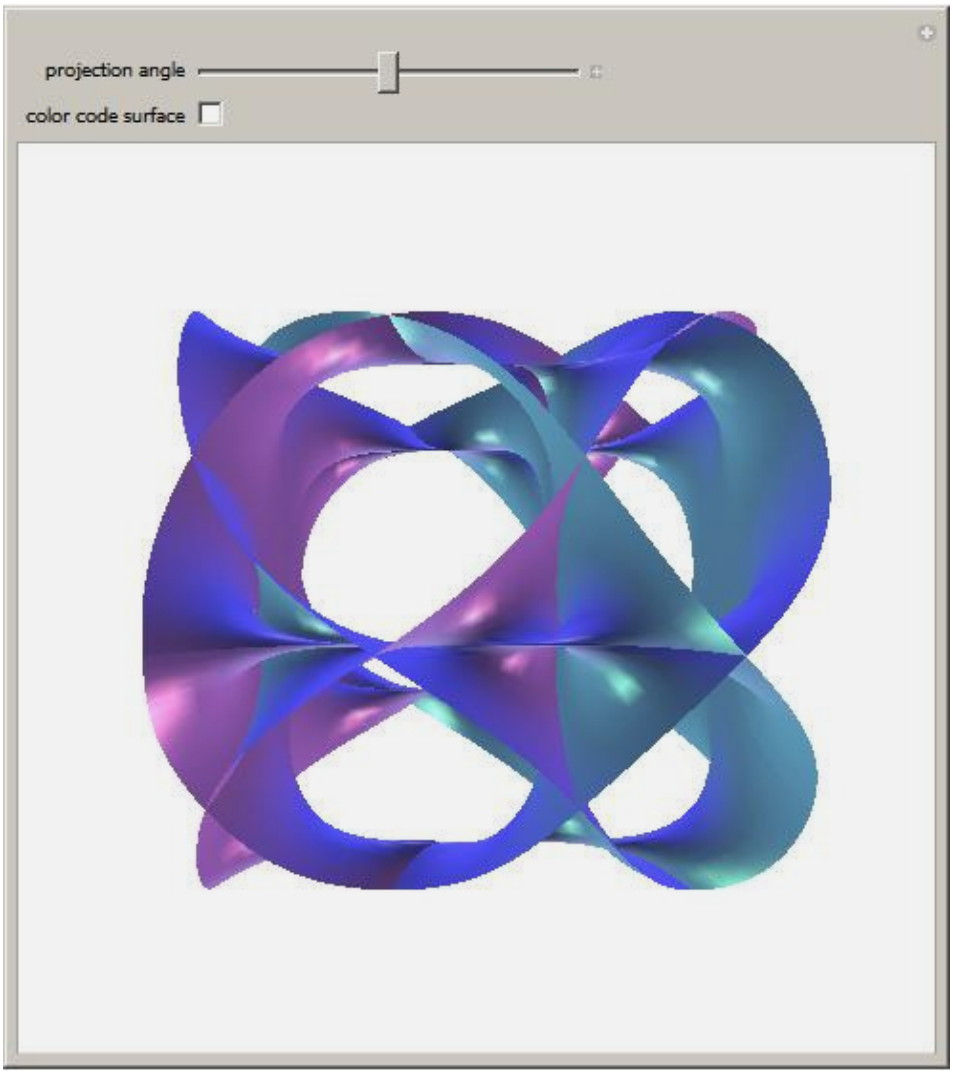
La physique quantique, plus qu'une échelle, est un ensemble de principes et de théories qui explique comment est l'univers infinitésimal. Les phénomènes les plus importants de la physique, qu'importe le niveau de grandeur, sont les forces (ou interactions) fondamentales : la plus connue étant la gravité. Nous savons que la gravité influe sur le mouvement d'un corps en fonction de la masse d'un autre et de la sienne — comme l'orbite de la lune vis-à-vis de la terre. Néanmoins, quantiquement, comment cela marche ? Nous ne savons pas et pourtant, nous avons nombre de théories comme celle des supercordes. Soit, au lieu de considérer les particules comme des points, elles sont envisagées comme des cordes (ouvertes ou fermées) vibrantes **[f]** en fonction de quelles particules elles représentent. Une corde électron ne vibrera pas de la même manière qu'une corde photon. Conceptuellement, cette théorie est moins intuitive que les calculs mathématiques qu'elle engendre.

De plus, ces derniers nous montrent une caractéristique encore plus étrange : les dimensions. Nous savons que notre univers est formé de quatre dimensions, trois d'espaces et une de temps. Avec cette théorie, nous en obtenons dix, neuf d'espaces et une de temps. Cela pose un problème, car il suffit d'ouvrir les yeux pour voir que ce n'est pas le cas. Pour résoudre

[26] Penrose Roger, *op. cit.*, page 532
[27] Penrose Roger, *op. cit.*, page 532
[28] Hanson Andrew J., « Espace Calabi-Yau », *Wolfram Demonstrations Project*, 7 mars 2011, repéré à *http://demonstrations.wolfram.com/CalabiYauSpace/* [consulté le 11 janvier 2023]

ce problème, nous imaginons que les six dimensions supplémentaires sont recroquevillées sur elles-mêmes.





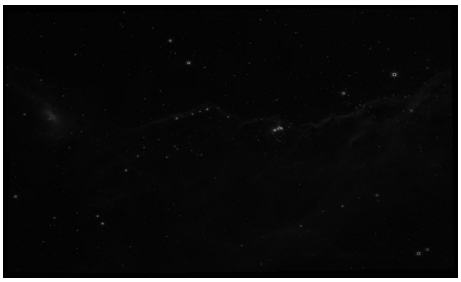
↑ « Espace Calabi-Yau », Andrew J. Hanson, simulations/démonstrations des variétés de Calabi-Yau, mars 2011, repéré à *http://demonstrations.wolfram.com/CalabiYauSpace/*

C'est ici qu'intervient les Calabi-Yau : ils sont le formalisme de supercordes à dix dimensions. Cette théorie peut sembler lointaine, contre-intuitive et faite de problèmes aux solutions absurdes. Cependant, mathématiquement, elle offre de nouvelles approches et de nouvelles découvertes présentant un grand pas pour la physique quantique. Les variétés de Calabi-Yau ont beau être des simulations mathématiques, elles restent, malgré leurs complexités, élégantes et attirantes de par leurs formes organiques, imbriquées (voir hypnotique) et leurs couleurs. Si leurs formes ne sont pas choisit car elles découlent de calculs, leurs couleurs, elles, le sont. Nous pouvons alors nous poser une question : est-ce à but fonctionnel, notamment sur la gestion du contraste et de la profondeur ou à but attractif ? Nous pouvons supposer que les experts (dans cette discipline) commencent à rendre leurs visuels plus attractifs tout en gardant cette objectivité mathématique. Nous verrons qu'un des principaux facteurs de popularisation d'images scientifiques est la couleur. Ce facteur est d'autant plus frappant en astronomie où la couleur renforce l'aspect spectaculaire **[g] [h]**.

2.1.4 – Orbitales atomiques

Nous avons vu beaucoup de formes aux concepts abscons. Maintenant, prenons légèrement du recul pour étudier une vision plus simple : les orbitales atomiques. Nous avons pu voir que les physiciens utilisent des diagrammes qui schématisent

[g]



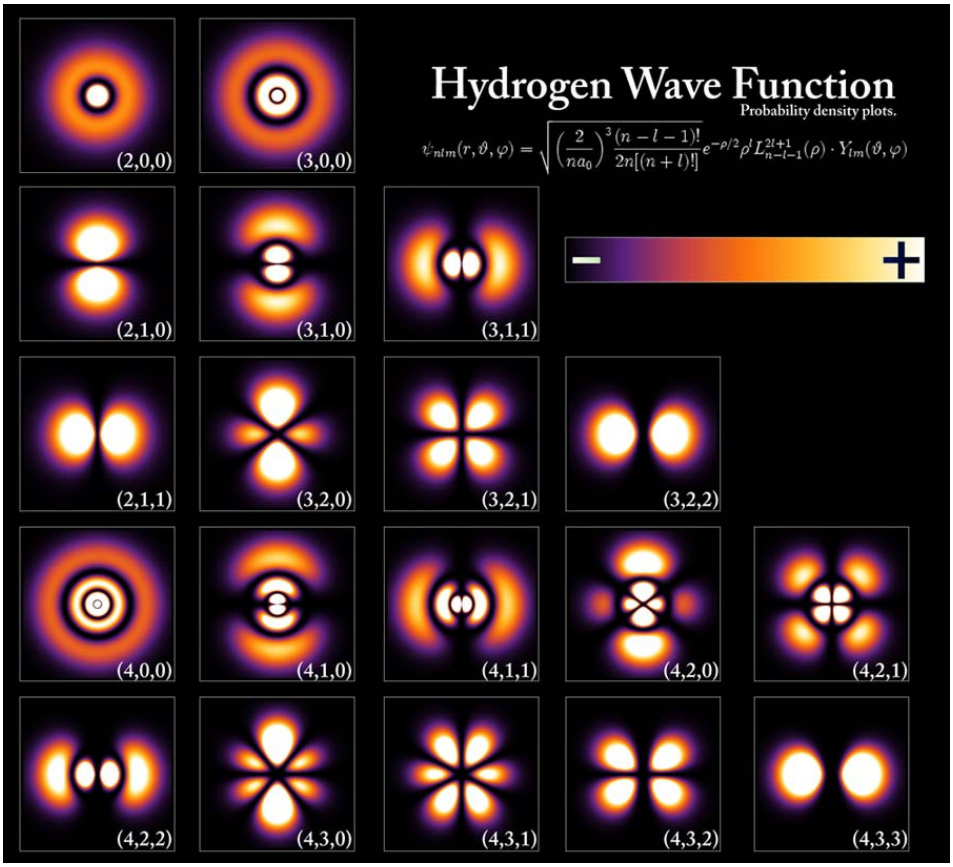
↑ **« Une image brute de la nébuleuse de la Carène vue par NIRCam, avant que la lumière infrarouge ne soit traduite en longueurs d'onde visibles. Image : Institut scientifique du télescope spatial. »**

[h]



↑ **« La même région de formation d'étoiles de la nébuleuse de la Carène, vue après la conversion des données infrarouges en longueurs d'onde visibles. Les étoiles brillantes ont de grands pics de diffraction, un artefact de l'image de Webb. Image : NASA, ESA, CSA et STScI »**. « Les couleurs des images du télescope Webb sont-elles ‹ fausses › ? », Schultz Isaac, images du site *Gizmodo*, août 2022, repéré à *https://gizmodo.com/webb-space-telescope-image-colorization-1849320633* [consulté le 3 janvier 2023]

des particules, comme l'électron, de façon ponctuelle. Pourtant, nous savons que ces dernières ne sont pas seulement des points ou des segments aussi nets. Les particules se comportent comme des ondes et ne peuvent ni être localisées, ni mesurées (dans leurs vitesses) en même temps. Ces deux principes sont nommés la dualité onde-corpuscule pour le premier et le principe d'incertitude d'Heisenberg pour le deuxième. Soit, comment savoir où se situe un électron dans un atome ? Les experts calculent l'emplacement le plus plausible grâce à des probabilités. Ils obtiennent alors plusieurs types d'orbitales en fonction de l'atome et du nombre d'électrons : s (sharp), p (principal), d (diffuse), et f (fundamental).



↑ « L'orbitale atomique ou l'image de l'atome », image du site *Astronoo*, 2013, repéré à *http://www.astronoo.com/fr/rubriques/matiere.html*

L'image montrée ici **[29]** décrit visuellement la densité de probabilité de trouver un électron en fonction du type d'orbitale. Nous apercevons que plus la couleur est claire plus le passage de l'électron est probable contrairement au plus foncé, le noir, où il n'y passe pas. C'est avec cet axe que nous déduisons qu'un concept décrit en langue naturelle et graphique est nettement plus compréhensible. Nous pouvons considérer que l'image est colorisée de façon pragmatique. Il est question de zones plus ou moins floues dictées par un dégradé. Les couleurs prises sont complémentaires et permettent de se distinguer les unes les autres. Toutefois, est-ce un choix également attractif ?

[29] « Représentation des premières orbitales électroniques de l'atome d'hydrogène en fonction de l'énergie de l'électron et de son moment cinétique, le niveau d'énergie augmente de haut en bas (n = 1, 2, 3, 4, 5,...) et le moment cinétique augmente de gauche à droite, (l = s, p, d, f, g) Crédit image : GNU Free Documentation License », « L'orbitale atomique ou l'image de l'atome », *Astronoo*, 2013, repéré à *http://www.astronoo.com/fr/rubriques/matiere.html* [consulté le 11 janvier 2023]

Pour conclure, parmi tous les cas que nous avons pu étudier, les formes créées par les experts en physique quantique sont stylisées, simplifiées et légendées. L'objectif est avant tout l'objectivité et l'efficacité. En outre, leur simplicité permet de synthétiser des calculs trop souvent interminables. Au demeurant, les formes de Calibi-Yau sont complexes avec un potentiel but d'attraction. Toutefois, elles permettent de visualiser ce qui, par conséquent permet un meilleur appui de réflexion.

2.2 – Les formes observées par les scientifiques

A posteriori, nous voici dans la seconde partie de cette première étude de cas où nous étudierons les formes observées par les physiciens. Nous y retrouverons des photographies ou des simulations avec pour fil rouge : le haut degré d'iconicité. Il semble logique de ne pas l'épargner si nous prenons en compte que la partie précédente est uniquement sur des formes à faible degré d'iconicité. De surcroît, si nous observons nos ressources de cette étude de cas : la présence de l'un est autant notable que l'autre.

2.2.1 – Particules dans une chambre à bulles

Alors, qu'est-ce qu'une particule ? Est-ce un être ponctuel ou répandu dans tout l'espace ? La simple comparaison de la figure (2.6) qui montre les traces de particules élémentaires dans des accélérateurs, et de la figure (2.3) nous montre que nous sommes face à une contradiction conceptuelle.

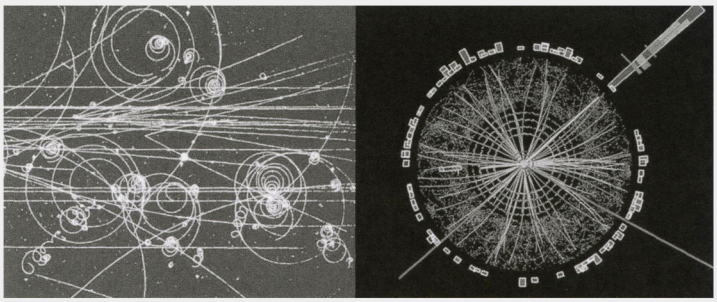


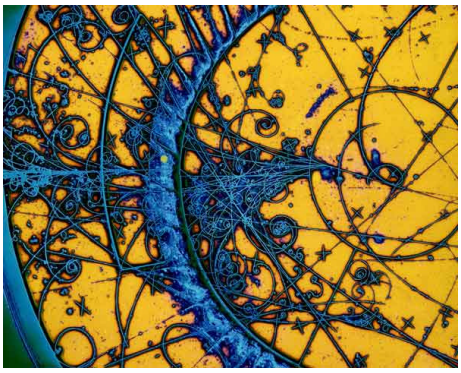
Fig. 2.6. *Gauche : Traces de particules dans une chambre à bulles des années 1960. Un faisceau de protons pénètre de la gauche dans la chambre, plongée dans un champ magnétique, et entre en collision avec les protons de la chambre. Les particules chargées produites ont des trajectoires courbées vers la droite ou la gauche suivant le signe de leur charge (©CERN). Droite : Traces de deux paires de leptons, en vert un électron et un positron, en rouge deux muons, produites dans la désintégration d'un boson de Higgs observé dans une collision proton-proton de 14 TeV au LHC du CERN par l'expérience ATLAS en juin 2012 (les couleurs sont visibles sur la couverture). Les multiples particules produites traversent le détecteur, extrêmement sophistiqué, et y déclenchent des signaux à partir desquels leurs trajectoires sont reproduites par ordinateur. Les faisceaux de protons sont perpendiculaires à la figure. (ATLAS Experiment ©2016 CERN)*

↑ Extrait de l'ouvrage *15 leçons de mécanique quantique*, Jean-Louis Basdevant, scan à la page 25, 2019

Nous amorcerons avec l'image montrée ci-contre. Celle-ci est populaire ; nous la retrouvons dans la plupart des articles sur la physique quantique, qu'ils soient sur écran ou sur papier, ainsi que dans de la documentation scientifique non vulgarisée (inter-experte). Pour cause, elle montre une observation qui a permis une grande avancée en physique des particules — soit une des disciplines sous-jacentes à la physique quantique. D'après l'image dans *15 leçons de mécanique quantique* de Jean-Louis Basdevant, il s'agit de :

« Traces de particules dans une chambre à bulles des années 1960. Un faisceau de protons pénètre de la gauche dans la chambre, plongée dans un champ magnétique, et entre en collision avec les protons de la chambre. Les particules chargées produites ont des trajectoires courbées vers la droite ou la gauche suivant le signe de leur charge [...] » ***[30]*** .

[i]



↑ « Voir l'invisible : événements en physique des particules », O'Luanaigh Cian, image du site *CERN*, juin 2015, repéré à *https://home.cern/fr/news/news/detectors/seeing-invisible-event-displays-particle-physics* [consulté le 15 janvier 2023]

[j]



↑ « Lecture 12, The Big Bang and Cosmology », Clarage Jim, document de conférence sur le site *University of Huston*, 2008, repéré à *https://uh.edu/~jclarage/astr3131/lectures/12/cern_bubblechamber.jpg* [consulté le 15 janvier 2023]

Basdevant nous offre de multiples informations.

Dans un premier temps, nous nous questionnons : qu'est-ce qu'une chambre à bulle ? Inventée au début des années 50 par le physicien Donald Arthur Glaser, elle permet, grâce à un système de liquide porté à ébullition, de photographier les traces de particules. En outre, d'analyser leurs caractéristiques telles que leur masse ou leur charge. Par ailleurs, cette prodigieuse invention lui a valu le prix Nobel de physique de 1960 alors qu'il n'avait que 36 ans.

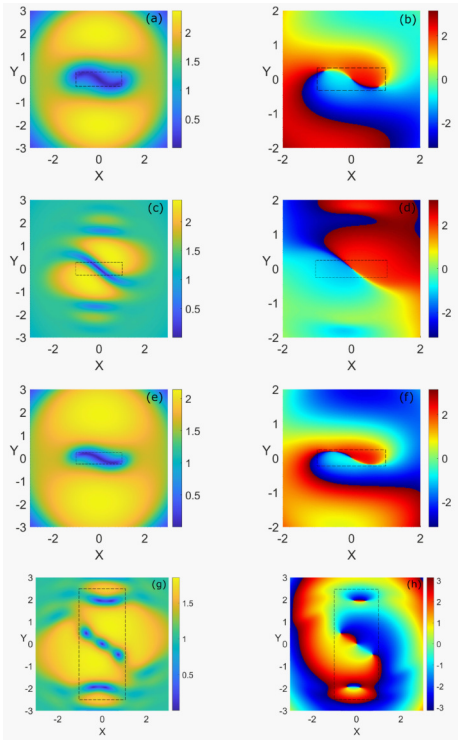
Dans un deuxième temps, nous apercevons sur l'image des lignes droites et d'autres courbées : cela est dû au champ magnétique. La direction fluctue en fonction de la charge électrique — positive ou négative — des particules utilisées. Il existe nombre de photographies relatant d'expériences similaires, montrant d'autres résultats et illustrant diverses publications. De plus, il est remarquable de voir que celles-ci montrent
ces images en couleurs, souvent saturées afin d'attiser l'attention et les rendre attractives **[i] [j]** comme les Calabi-Yau. Les lignes colorées et courbées en spirales, les rendant presque hypnotisantes. De même qu'il y a une fonction à ces couleurs : distinguer les éléments grâce au contraste et apercevoir plus de détails, ainsi, cela améliore la compréhension de l'image.

2.2.2 – Les condensats de Bose-Einstein

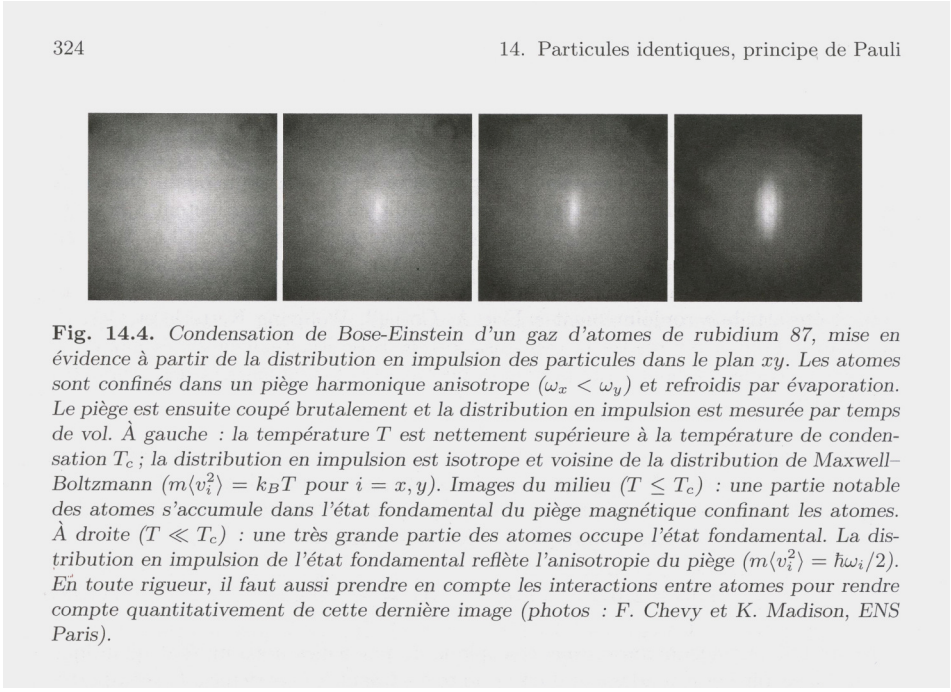
Un phénomène moins renommé pourtant notable : les condensats de Bose-Einstein. Il s'agit d'un état qui se produit quand les bosons présents dans les gaz refroidissent à très basse température. Seulement, qu'est-ce qu'un boson ? Pour le savoir, nous devons nous plonger dans le modèle standard de la physique des particules. Un terme qui peut paraître abscons, néanmoins abordable.
Tel le tableau de Mendeleïev classant les éléments chimiques, le modèle standard organise les différents types de particules. Les deux principales classes sont les fermions et les bosons. Les fermions sont les particules constituant
la matière et les bosons sont celles constituant les forces fondamentales. Prenons un exemple : le photon produit la force électromagnétique. Présentement que nous savons ce qu'est un boson, que se passe-t-il à basse température ? Nous connaissons la dualité onde-corpuscule — une particule se comporte tantôt comme un corps ponctuel et tantôt comme une onde. À ultra-basse température, les ondes sont si importantes qu'elles deviennent plus grandes que la distance probable entre les atomes. Les bosons peuvent alors se positionner dans le même état énergétique et former une seule et immense onde : un condensat de Bose-Einstein.

[30] Basdevant Jean-Louis, *op. cit.*, page 25

[k]



↑ Figure 8 de l'article « A Method for the Dynamics of Vortices in a Bose-Einstein Condensate : Analytical Equations of the Trajectories of Phase Singularities », Ferrando María-García, Sergi, Albert, Conejero J. Alberto, Fernández De Córdoba Pedro et Ángel García-March Miguel, image du site *MDPI*, janvier 2023, repéré à *https://doi.org/10.3390/condmat8010012* [consulté le 9 novembre 2023] **Note : En voici un exemple. Les couleurs sont présentes afin de différencier les caractéristiques et de les analyses, soit un objectif pragmatique. Néanmoins, il est intéressant de supposer que l'attractivité dû aux couleurs et aux mouvements fluides, hypnotiques, ne soit qu'une conséquence non voulue. L'article, d'où viennent les observations, n'est pas suffisamment diffusé, ni vulgarisé pour attirer un public populaire. Leur attraction est-elle donc un fruit du hasard ?**



324 14. Particules identiques, principe de Pauli

Fig. 14.4. *Condensation de Bose-Einstein d'un gaz d'atomes de rubidium 87, mise en évidence à partir de la distribution en impulsion des particules dans le plan xy. Les atomes sont confinés dans un piège harmonique anisotrope ($\omega_x < \omega_y$) et refroidis par évaporation. Le piège est ensuite coupé brutalement et la distribution en impulsion est mesurée par temps de vol. À gauche : la température T est nettement supérieure à la température de condensation T_c ; la distribution en impulsion est isotrope et voisine de la distribution de Maxwell–Boltzmann ($m\langle v_i^2\rangle = k_B T$ pour $i = x, y$). Images du milieu ($T \leq T_c$) : une partie notable des atomes s'accumule dans l'état fondamental du piège magnétique confinant les atomes. À droite ($T \ll T_c$) : une très grande partie des atomes occupe l'état fondamental. La distribution en impulsion de l'état fondamental reflète l'anisotropie du piège ($m\langle v_i^2\rangle = \hbar\omega_i/2$). En toute rigueur, il faut aussi prendre en compte les interactions entre atomes pour rendre compte quantitativement de cette dernière image (photos : F. Chevy et K. Madison, ENS Paris).*

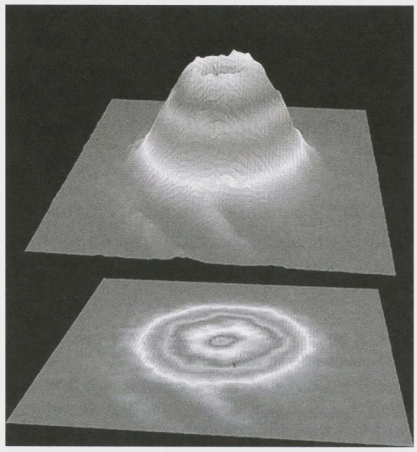
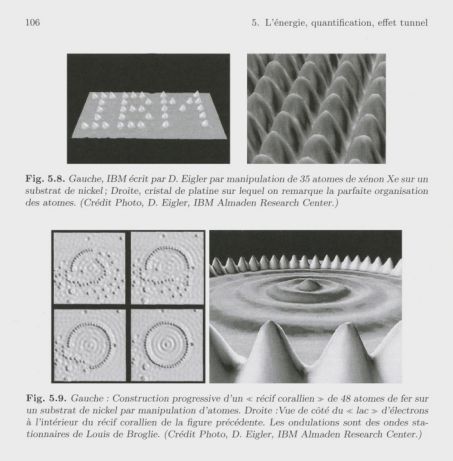


Fig. 14.5. *Condensat de Bose-Einstein d'un gaz d'atomes de rubidium 87. Les atomes sont confinés dans un piège harmonique isotrope dans le plan xy et refroidis par évaporation. Ce condensat (environ 1 million d'atomes) a une structure de vortex, il correspond non pas à l'état fondamental, mais à l'état immédiatement supérieur de moment cinétique $\ell = 1$. Les deux images sont obtenus par éclairage du condensat par un faisceau laser dans le plan (xy) et perpendiculairement à ce plan. (photos : F. Chevy, K. Madison et J. Dalibard, ENS Paris). (Figure en couleurs sur la face interne de la couverture.)*

↑ Extrait de l'ouvrage *15 leçons de mécanique quantique*, Jean-Louis Basdevant, scan à la page 324, 2019

Les images ci-contre sont distinctement le phénomène, pour la première, et le résultat, pour la deuxième, d'une observation de condensats de Bose-Einstein. Sur la première, nous avons une condensation, le phénomène visible, nous montrant comme une diffusion fluctuante en fonction de la température. Sur la deuxième, nous apercevons un condensat, soit la simulation du résultat, l'état en lui-même. Ici, nous avons des visuels sans quelconque retouche qui permettrait une attirance du public ; l'unique but est l'objectivité de la forme observée.
Cet objectif favorise tout de même la compréhension, car il est un support à la réflexion et à la communication de la théorie ou de l'expérimentation. Néanmoins, d'autres visuels concernant des observations/simulations de condensats sont publiés. Certains utilisent la couleur de façon pragmatique et sont attrayants malgré eux **[k]**.

[l]



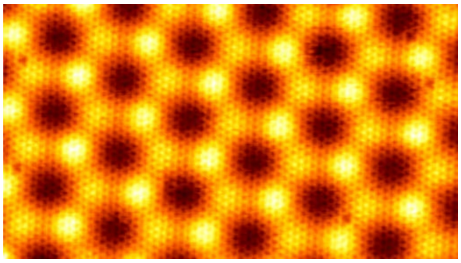
106 5. L'énergie, quantification, effet tunnel

Fig. 5.8. *Gauche, IBM écrit par D. Eigler par manipulation de 35 atomes de xénon Xe sur un substrat de nickel ; Droite, cristal de platine sur lequel on remarque la parfaite organisation des atomes. (Crédit Photo, D. Eigler, IBM Almaden Research Center.)*

Fig. 5.9. *Gauche : Construction progressive d'un « récif corallien » de 48 atomes de fer sur un substrat de nickel par manipulation d'atomes. Droite :Vue de côté du « lac » d'électrons à l'intérieur du récif corallien de la figure précédente. Les ondulations sont des ondes stationnaires de Louis de Broglie. (Crédit Photo, D. Eigler, IBM Almaden Research Center.)*

↑ Extrait de l'ouvrage *15 leçons de mécanique quantique*, Jean-Louis Basdevant, scan à la page 106, 2019

[m]



↑ **« Cette image en fausses couleurs saisie avec un microscope à effet tunnel montre la structure en nid d'abeille du graphène. Il s'agit d'un feuillet cristallin composé d'atomes de carbone formant un réseau hexagonal. C'est cette structure en 2D qui dote le graphène de propriétés remarquables.© ESRF »**, « Le graphène viole la loi de conduction de la chaleur de Fourier », Sacco Laurent, image du site *Futura Sciences*, mai 2014, repéré à *https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-graphene-viole-loi-conduction-chaleur-fourier-53740/* [consulté le 9 novembre 2023]

[n]



↑ *A Boy And His Atom : The World's Smallest Movie*, IBM, vidéo *Youtube*, février 2021, capture d'écran à 0:43

2.2.3 – La microscopie à effet tunnel

Nous voilà avec un nouveau principe de physique quantique : l'effet tunnel. Une étrange bien que fascinante caractéristique, l'effet tunnel est un phénomène qui permet à une particule de traverser une paroi. Concrètement, nous le fréquentons couramment. Quand notre voisin écoute de la musique fortement, nous l'entendons de façon plus ou moins amoindri en fonction du débit sonore. Cela signifie qu'une petite partie des ondes sonores traversent le mur qu'il y a entre chez nous et le voisin. Nous nous souvenons de la dualité onde-corpuscule. Si nous visualisons cet événement de façon corpusculaire, alors parmi toutes les particules propulsées par le débit du son, quelques-unes traverseront le mur comme si un tunnel s'était ouvert pour les laisser passer — d'où le nom de cet effet.

5.7 Microscopie à effet tunnel, Nanotechnologies 105

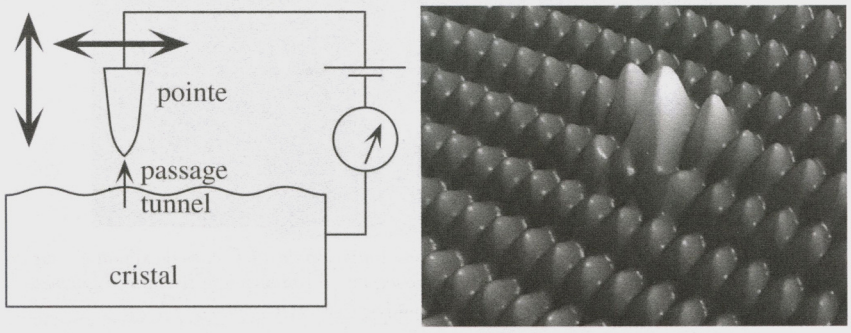


Fig. 5.7. *Gauche, Principe d'un microscope à effet tunnel. On déplace une pointe fine au voisinage d'un cristal à l'aide de transducteurs piézoélectriques. Une boucle d'asservissement ajuste la distance de la pointe à la surface du cristal de façon que le courant provenant du passage d'électrons par effet tunnel soit constant. Le signal d'erreur de la boucle d'asservissement produit une cartographie directe de la distribution de densité électronique (du potentiel électrostatique) à la surface du cristal. Un exemple est montré à droite où l'on voit l'effet d'un atome d'antimoine unique sur les électrons des atomes de la surface d'un cristal de silicium. Cette microscopie permet de faire de fabriquer des structures électroniques de haute précision. La taille réelle de l'échantillon représenté est ∼ 3 nm. D'après Philipp Studer, Steven Schofield, Cyrus Hirjibehedin et Neil Curson (2012), (Crédit Photo, London Center for Nanotechnology).*

↑ Extrait de l'ouvrage *15 leçons de mécanique quantique*, Jean-Louis Basdevant, scan à la page 105, 2019

Maintenant, qu'est-ce que la microscopie à effet tunnel ? Comment cela peut-il fonctionner ? Créé en 1981 par Heinrich Rohrer et récompensé par le prix Nobel de physique de 1986, le microscope à effet tunnel permet une grande résolution sur des mesures infinitésimales (0,01 nanomètre) et d'étudier des surfaces avec précision. Une pointe, dont l'extrémité est formée d'un seul atome, cartographie une surface voulue puis les experts appliquent un passage d'électrons — grâce à l'effet tunnel — qui offre un courant électrique sensible ; permettant cette grande résolution. Les images ci-dessus et ci-contre **[l]** nous montre à la fois le schéma de son fonctionnement et son résultat impressionnant. Semblablement, il existe des observations colorisées qui sont utilisées dans un contexte de diffusion populaire **[m]**.

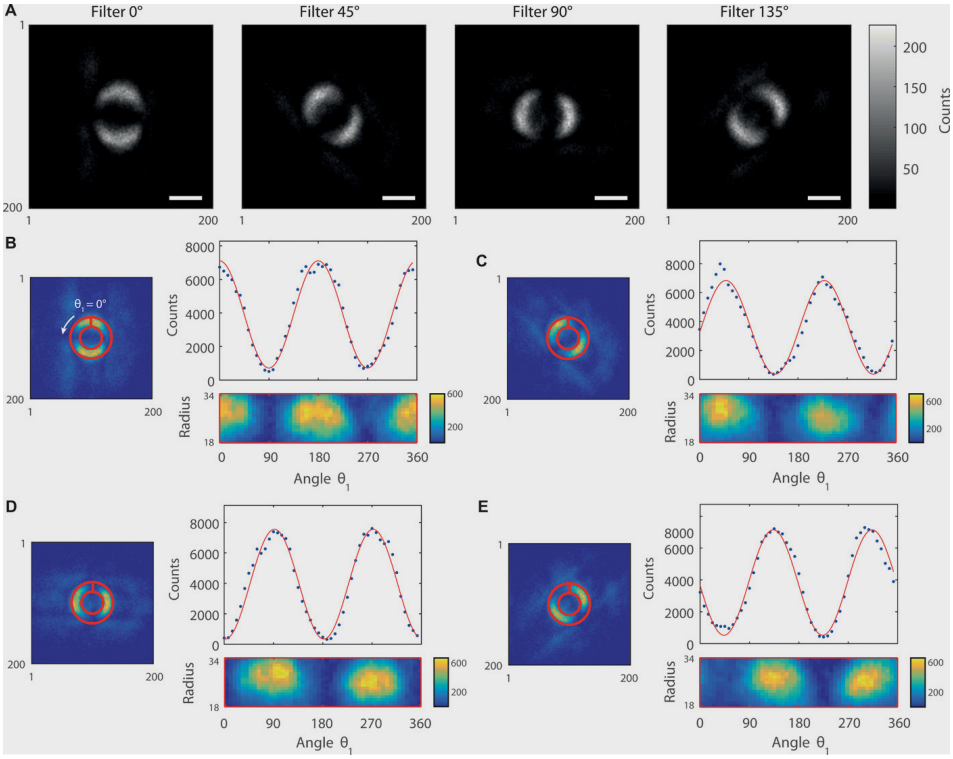
Nous pouvons également observer l'expérimentation d'IBM (International Business Machines Corporation) **[n]** qui nous fait état de l'effet tunnel de diverses façons plus ou moins attendu, notamment avec leur vidéographie

A Boy And His Atom : The World's Smallest Movie **[31]** . Au-delà d'une objectivité scientifique, cette utilisation permet un étonnement et un attrait stimulant la curiosité du spectateur, soit son intérêt.

2.2.4 – Intrication quantique

Afin de clore cette étude de cas, nous voici dans notre dernier axe. Celui-ci porte sur la première photographie d'une intrication quantique. Aussi connu sous le nom d'enchevêtrement quantique, ce phénomène est particulièrement populaire pour un autre terme qui constitue son principe : la téléportation quantique.

Ainsi, nous nous demandons tous : alors, la téléportation existe ?
C'est un terme à prendre avec des pincettes, car après tout, nous ne faisons pas disparaître une particule pour la transférer à l'autre bout de la planète.
Le processus diffère. Nous pouvons énoncer que des états intriqués peuvent communiquer instantanément. Il faut savoir que si nous prenons deux particules enchevêtrées et que nous inscrivons une information sur l'une d'entre elle, alors l'autre aura l'information transmise qu'importe la distance (en théorie).



↑ « Experimento de tipo Bell con imágenes ‹ fantasma › », Villatoro Francisco R., images du site *Naukas*, juillet 2019, repéré à *https://francis.naukas.com/2019/07/14/experimento-de-ti-po-bell-con-imagenes-fantasmas/*

[31] IBM (International Business Machines Corporation), *A Boy And His Atom : The World's Smallest Movie*, *Youtube*, avril 2013, repéré à *https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0* [consulté le 16 janvier 2023]

Sur nos images **[32]** , nous pouvons apercevoir des surfaces ponctuelles plutôt floues sur un fond noir — dont si lien existe, reste à déterminer. Pourtant, il s'agit bel et bien d'images montrant l'intrication de deux photons. Le principal chercheur de l'étude, Paul-Antoine Moreau déclare que l'image est :

> *« une élégante démonstration d'une propriété fondamentale de la nature ».*

Afin de saisir ce phénomène, ce dernier, ainsi qu'une équipe d'autres physiciens, ont envoyé un flux de photons intriqués sur ce qu'ils ont décrit comme :

> *« objets non conventionnels » **[33]** .*

En soi, l'expérience a permis de capturer quatre images de photons sous quatre transitions de phases différentes. Toutefois, il ne s'agit pas concrètement d'une photographie, il est question d'une image composite ressemblant diverses captures en fonction des phases des photons. Souvent dû à l'usage des technologies numériques, les images composites sont monnaie courante dans cette discipline. Ici, il n'est question uniquement d'objectivité visuelle notamment lorsque que l'on voit la complexité de ceux-ci. Cette remarque appuie les déductions de nos précédents axes ; les visuels en science, fait par la science, ont plusieurs buts. Nous reprenons l'objectivité visuelle avec l'intrication.
Le support tangible à la communication (ce qui la facilite) notamment sur la première partie avec les diagrammes. Enfin, l'attrait pour le public avec une retouche ou une formalisation des visuels comme la chambre à bulle, l'effet tunnel ou les condensats.

3.0 – Les formes réalisées par les vulgarisateurs

Tout au long de notre étude, nous avons pu aborder la physique quantique de façon brève et réductrice. Nous vulgarisons afin de saisir des exemples spécifiques qui nécessitent un minimum de bagage scientifique : nous ne sommes pas experts, mais nous sommes curieux. Dans cette seconde étude de cas, nous nous questionnerons sur les formes réalisées et utilisées par divers médiateurs/vulgarisateurs. Commençons par choisir le terme. Il s'agit d'un grand débat, néanmoins, nous assumerons ici la vision de Jean Rostand, historien des sciences :

> *« Acceptons donc résolument, courageusement ce vieux mot, consacré par l'usage, de vulgarisation, en nous souvenant que vulgus veut dire peuple et non point le vulgaire » **[34]***

et choisirons *vulgarisateur*. Il est important de savoir que cette étude de cas est extrêmement flexible ; les vulgarisateurs ne font pas partie d'un domaine fixe. Ils peuvent être autant scientifiques que designers graphiques. Alors, pourquoi cette catégorisation ? Céans, il sera question d'objets de vulgarisation (fait par

[32] Villatoro Francisco R., « Experimento de tipo Bell con imágenes ‹ fantasma › », *Naukas*, juillet 2019, repéré à *https://francis.naukas.com/2019/07/14/experimento-de-ti-po-bell-con-imagenes-fantasmas/* [consulté le 21 janvier 2023]
[33] Boisson Thomas, « Des physiciens révèlent la toute première image de l'intrication quantique entre deux particules », *Trust my science*, 2019, repéré à *https://trustmyscience.com/premiere-image-intrication-quantique-entre-photons/* [consulté le 4 janvier 2023]
[34] Interprété par Raichvarg Daniels et Jacques Jean, *Savants et ignorants une histoire de la vulgarisation des sciences*, Seuil, 1991, page 9, Origine par Rostand Jean, *Biologie et Humanisme*, 1944

un scientifique, illustrateur, designer ou collaborations) destinés à un public profane.

3.1 – Reprise des formes scientifiques

Nombreux sont les objets éditoriaux n'utilisant que l'écrit, des schémas filaires et/ou des formes réalisées par des scientifiques [voir 2.1 et 2.2]. Notre exemple, appuyant notre axe, sera *Initiation à la physique quantique, la matière et ses phénomènes* par Valerio Scarani. Le titre semble révélateur : nous sommes invités à apprendre la surface de cette théorie. Par ailleurs, en amorce du texte, l'auteur nous précise :

> *« la seule chose que je puisse faire, c'est montrer la physique quantique à l'œuvre. »* ***[35]*** .

Une ambition réussie d'après plusieurs experts tels que Jean-Marc Lévy-Leblond, qui a également écrit la préface **[36]** . Quand nous entrons dans le livre, nous slalomons entre écrits et schémas. Finalement, le concept de montrer est assez pauvre. L'écrit est éminemment clair avec un léger attrait grâce à une narration inclusive vis-à-vis du lecteur.

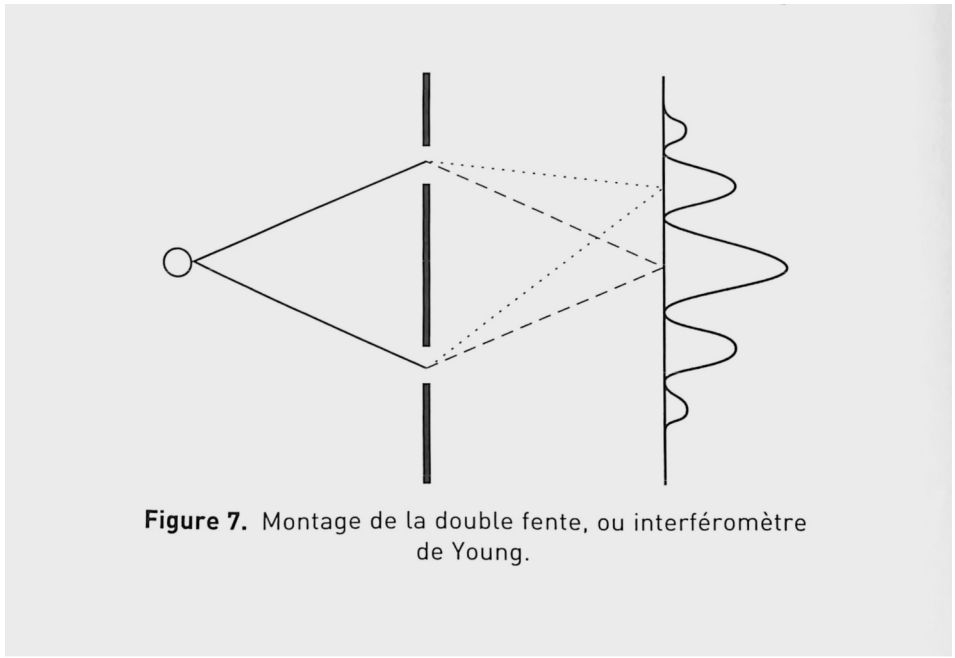


Figure 7. Montage de la double fente, ou interféromètre de Young.

↑ Extrait de l'ouvrage *Initiation à la physique quantique, la matière et ses phénomènes*, Valerio Scarani, scan la page 30, 2016

[35] Scarani Valerio, « Invitation », *Initiation à la physique quantique, la matière et ses phénomènes*, édition Vuibert, Paris, 2016, page XVIII
[36] Jean-Marc Lévy-Leblond, Dominique Leglu, Ciel & Espace, La recherche, Michel Bitbol, Ecole polytechnique

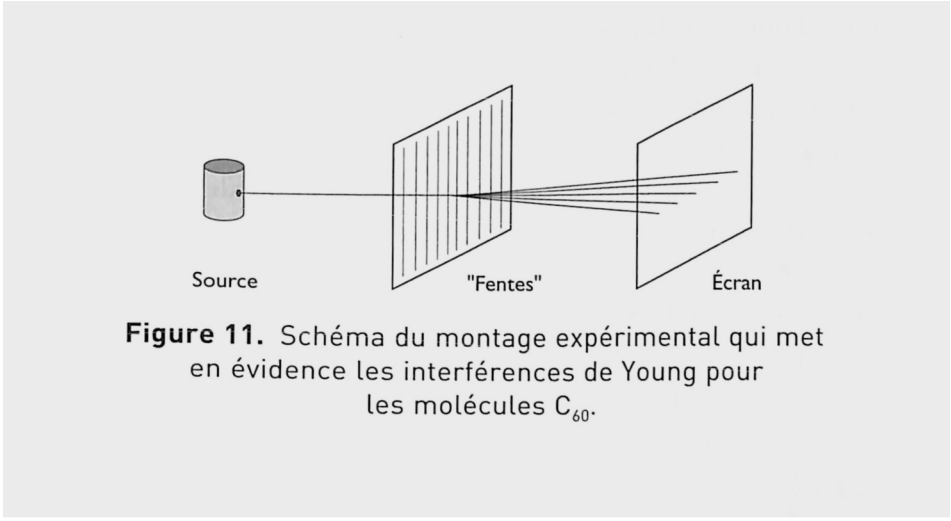
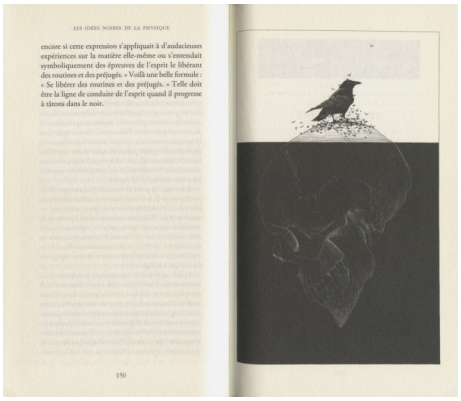


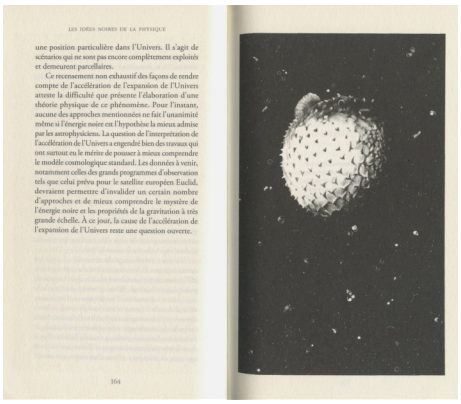
Figure 11. Schéma du montage expérimental qui met en évidence les interférences de Young pour les molécules C_{60}.

↑ Extrait de l'ouvrage *Initiation à la physique quantique, la matière et ses phénomènes*, Valerio Scarani, scan la page 51, 2016

[o]



[p]



↑ Extrait de l'ouvrage *Les idées noirs de la physique*, Vincent Bontems et Roland Lehouq, scan des pages 151 et 165, 2016

Toutefois, nous nous apercevons que les formes qui « montrent » la physique quantique ne sont ni excessivement nombreuses ni compréhensibles. De plus, si nous reprenons la pensée de Roger Penrose [voir 1.0.2], les schémas de ce type nous rappellent les codes visuels des fiches de cours ; une vision doxique voilant la curiosité d'un lecteur lambda, alors rebuté par l'aspect et l'écrit prédominant.

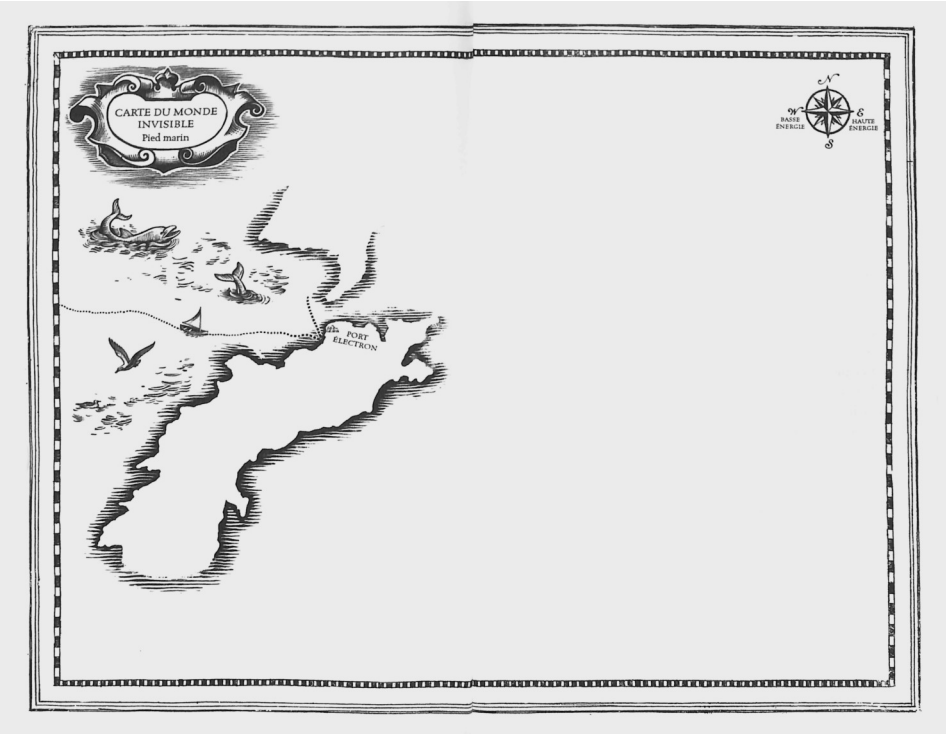
Dans l'épilogue, Scarani introduit quelques outils mathématiques. Il s'agit d'une pratique intéressante pour plusieurs raisons : elle atteste du lien physico-mathématique, elle n'est pas abusée pouvant décourager le lecteur et elle participe à l'émergence populaire des mathématiques. En conséquence, malgré certaines inclusions, la forme de l'objet éditorial ne permet pas un attrait visuel suffisant pour attiser la curiosité des « non-physiciens ».

3.2 – Formes métaphoriques et analogiques

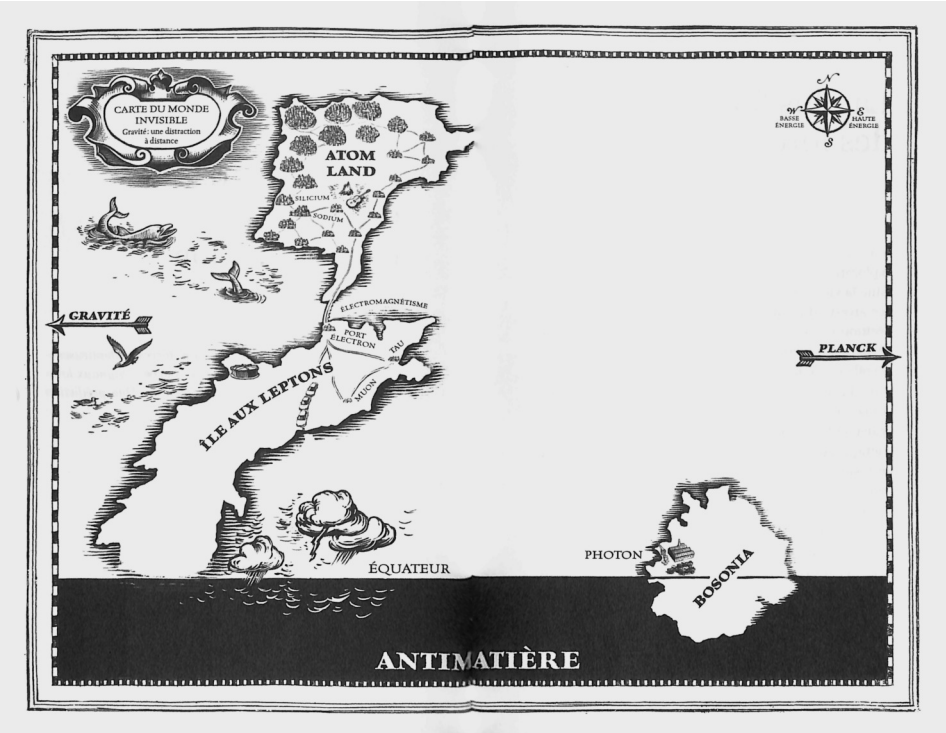
Nous comprenons qu'il est idéal de travailler avec plusieurs spécialistes complémentaires. Certains vulgarisateurs font appel à des illustrateurs ou des designers graphiques afin d'améliorer l'objet qu'ils souhaitent réaliser et d'avoir une complémentarité qui le nourrisse. L'exemple de cet axe qui va nous démontrer cette réflexion est *Atom Land : voyage dans le monde étrange (et incroyablement petit) de la physique des particules* de Jon Butterworth **[37]** .

Néanmoins, avant de l'étudier, regardons brièvement les résultats plus courant de ces collaborations. Nous pouvons prendre *Les idées noirs de la physique* illustré par Scott Pennor's **[38]** . Nous avons un objet aux visuels métaphoriques, presque poétiques qui ne nourrissent, ni ne complémentarisent, l'écrit prédominant **[o] [p]**.

[37] Butterworth Jon, *Atom Land : voyage dans le monde étrange (et incroyablement petit) de la physique des particules*, édition Quanto, 2018
[38] Bontems Vincent et Lehouq Roland, *Les idées noires de la physique*, Les belles lettres, Paris, 2016



↑ Extrait de l'ouvrage *Atom Land : voyage dans le monde étrange (et incroyablement petit) de la physique des particules*, Butterworth Jon, scan d'une cartographie, pages 20–21, 2018



↑ Extrait de l'ouvrage *Atom Land : voyage dans le monde étrange (et incroyablement petit) de la physique des particules*, Butterworth Jonh, scan d'une cartographie, pages 110–111, 2018



↑ Extrait de l'ouvrage *Atom Land : voyage dans le monde étrange (et incroyablement petit) de la physique des particules*, Butterworth Jon, scan d'une cartographie, pages 256–257, 2018

Atom Land est une des exceptions. Son concept, novateur, est pourtant également métaphorique et analogique. Néanmoins, il permet une complémentarité au texte grâce à son efficacité et la mise en scène spatiale des concepts par la cartographie. Évidemment, l'auteur précise qu'il ne s'agit pas d'une représentation exacte, mais propose un support visuel réflexif. Mettre en analogie des îles interagissant par des voyages, nous fait comprendre plus aisément les différents types de particules du modèle standard [voir 2.2.2]. Ce concept de cartographie permet même un possible amusement pour le lecteur, car ce dernier peut circuler entre les mots et les cartes. De plus, l'écrit est progressif dans la vulgarisation, rendant l'expérience de lecture plus pédagogique pour le lecteur, initié à rythme moins dense.

3.3 – Manuels et codes visuels scolaires

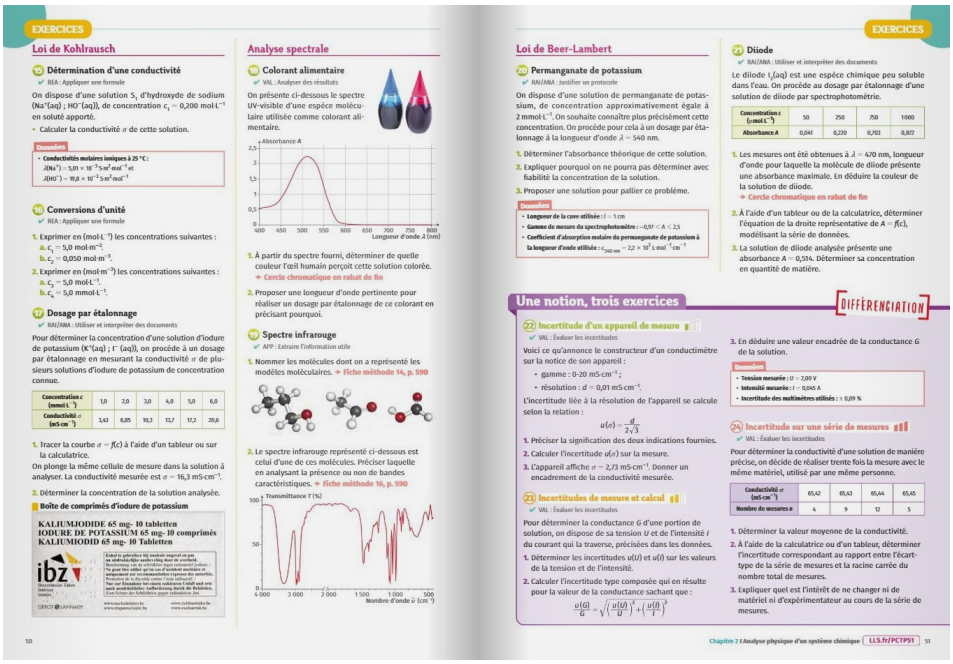
La vulgarisation dans l'enseignement, quels résultats avons-nous ?
Lionel Dutrieux, dans son article « De quelles manières la mise en page et la présentation graphique des manuels scolaires peuvent-elles aider le jeune en apprentissage ? » **[39]** , décrit la nécessité d'avoir manuel scolaire lisible ainsi que l'importance des formes engendrées — qu'elles soient typographiques ou visuelles.

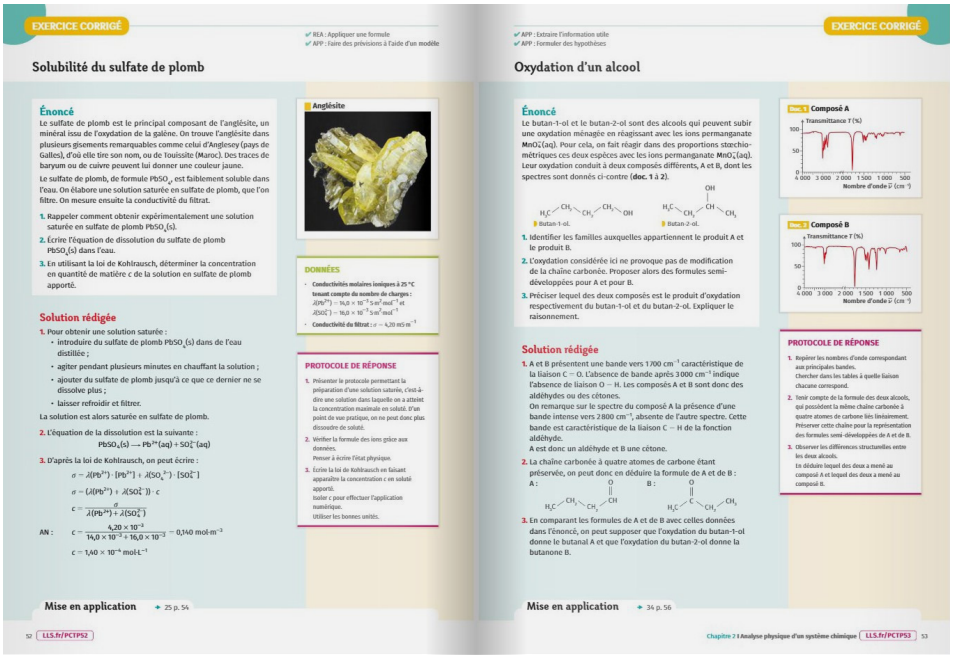
> *« il est établi que la mise en page à une réelle influence sur l'élève : elle améliore la lecture, motive l'élève et facilite l'acquisition des connaissances. Mais, mal utilisée, elle peut provoquer l'effet inverse. » **[40]***

[39] Dutrieux Lionel, « De quelles manières la mise en page et la présentation graphique des manuels scolaires peuvent-elles aider le jeune en apprentissage ? », *Medium*, 2016, repéré à *https://medium.com/liove/de-quelles-manières-la-mise-en-page-et-la-présentation-graphique-des-manuels-scolaires-peuvent-1afdca651ea2* [consulté le 6 janvier 2023]
[40] *Ibid.*

À la fin de son article, nous pouvons lire l'interview qu'il a mené en 2016 avec Olivier Ruol, éditeur dans les disciplines Sciences chez De Boeck Education. Nous y apprenons que les schémas sont refait — car ils sont déjà présents dans les manuscrits — par des designers graphiques. Toutefois, comment expliquer ces codes visuels peu attrayant ?

D'après Olivier Ruol, les couleurs saturées sont choisies pour attirer l'attention ainsi que pour distinguer les diverses parties. Les encadrés, comme les pictogrammes, lui paraissent importants. Tous ces codes sont donc répétés au fur et à mesure des nouvelles éditions permettant peu d'innovations. Attirer l'attention est un objectif premier avec la lisibilité. Néanmoins, il est crucial d'envisager que l'un l'autre peuvent s'annihiler si les experts ne trouvent pas un bon équilibre. Prenons un exemple : si nous devons distinguer un grand nombre de parties dans une même double-page et que, par conséquent, nous utilisons nombre de couleurs plus ou moins saturées, le résultat peut alors devenir peu harmonieux et peu attrayant.





↑ Extraits du manuel de Physique-Chimie Terminale, *Le livre scolaire*, captures de l'édition numérique, page 50–53, Collection 2020

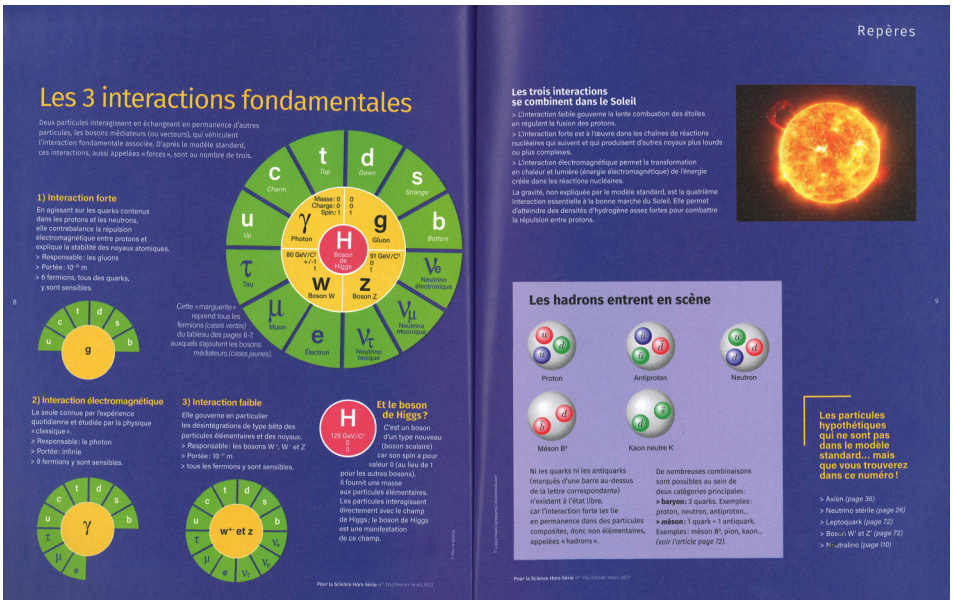
Voyons plusieurs doubles-pages du manuel de Physique-Chimie Terminale Collection 2020 du collectif Le livre scolaire **[41]** . Qu'apercevons-nous vis-à-vis de notre exemple précédent ? Les couleurs sont multipliées et leurs utilisations sont extrêmement importantes. La conséquence est qu'en tant que lecteur, nous ne savons où donner de la tête. Certaines utilisations ne sont pas nécessaires comme la colorisation des fonds ou des lettres a., b., c., Etc. Nous ne savons quoi réellement distinguer ni où doit aller notre attention. Deuxième conséquence : la lisibilité est réduite par cette utilisation de couleur surabondante.

3.4 – Magazines scientifiques

Les vulgarisateurs designers graphiques s'occupent de conceptions graphiques d'objets éditoriaux tels que des manuels, vu précédemment, et des magazines. Si nous allons dans une médiathèque au rayon des revues : qu'observons-nous ? Certains mots ou titrages sont nettement imposants, une utilisation surabondante de la couleur et codes semblables aux journaux comme les colonnes de textes et les jeux d'échelles au niveau des titrages. L'objectif que nous pouvons déduire est d'attirer le plus d'attentions possibles, être dynamique et attrayant. Par ailleurs, afin d'illustrer notre propos, regardons notre exemple : le hors-série Pour la science n°114 *Physique des particules, dépasser le modèle standard ?* **[42]** .

[41] « Physique-Chimie Terminale », *Le livre scolaire*, collection 2020, repéré à https://www.lelivrescolaire.fr/books/ [consulté le 6 janvier 2023]
[42] Pour la science Hors-série n°114, *Physique des particules, dépasser le modèle standard ?*, janvier 2022





↑ Extrait du n°114 *Physique des particules, dépasser le modèle standard ?*, Pour la science, scans des pages 6–9, janvier 2022

En amorce des articles scientifiques, nous pouvons voir deux doubles-pages « repères » pour vulgariser le modèle standard [voir 2.2.2] en le redessinant et expliquant l'implication des forces fondamentales [voir 2.1.3]. Une initiative nécessaire ? Si nous nous intéressons à la physique quantique et que nous voulons en savoir plus grâce à un magazine scientifique. Le contenu dense des articles pourrait rebuter un lecteur pour les raisons analysées en introduction. Toutefois, si nous changeons son expérience de lecture en l'amenant doucement au sujet avec des étapes de vulgarisations, la curiosité du lecteur sera moins heurtée. Qu'en est-il de l'aspect visuel ? Certains choix peuvent nuire à la compréhension : les bosons ne sont pas classés comme les fermions, les couleurs et les visuels diffèrent d'une double-page à l'autre, les titrages n'ont pas tous la même graisse ou la même taille. Nous pouvons déduire que, malgré l'intention, la réalisation manque de cohérence et d'invariables.

[q]



↑ **« Un projet est la plus complexe des structures produites par l'activité mentale. Un projet de design est à la fois analytique et synthétique, spécifique et général, concret et hypothétique. Il s'en tient à la chose et aux demandes, il se saisit de faits et ouvre de nouveaux espaces de pensée. Il coupe les cheveux en quatre et ouvre des perspectives. Il suppute et ouvre des horizons de possibilités. […] le design transcende théorie et pratique et n'ouvre pas seulement une nouvelle réalité, mais également de nouvelles perspectives. »**, Extrait de l'ouvrage *Le monde comme projet*, Aicher Olt, image du site *Édition B42*, juin 2015. **Note : Il indique une vision du design graphique utilisé ici. Les objets de design sont pensés d'une façon différente des autres objets, ils sont le résultat d'une recherche approfondit d'un sujet, d'une valeur ou d'une question, souvent sociétale. Par ailleurs, ce sont des objets expérimentaux cherchant à ouvrir un maximum de champs possible.**

4.0 – Les formes réalisées par les designers

Finissons sur notre dernière étude de cas, concluant cette réflexion : les formes réalisées et utilisées par les designers graphiques. Nous avons précisé plus haut que certains vulgarisateurs sont des designers, toutefois pour cette étude de cas, il est question d'objets de design **[q]** plus que d'objets de vulgarisation. Nous analyserons des projets avec des caractéristiques visuelles différentes afin d'évaluer au mieux cette partie.

4.1 – Pédagogie par analogies

Commençons avec *Le mystère du monde quantique* par Thibault Damour et Mathieu Burniat **[43]** . Cet objet éditorial est une bande dessinée coécrite par un illustrateur spécialisé en narration, Mathieu Burniat, et un physicien théoricien spécialiste en cosmologie quantique, Thibault Damour.

« Derrière les équations, il y a des idées accessibles de 9 à 77 ans » ***[44]***

Le scénario prétexte l'explication graphique, naturelle et symbolique de la physique quantique. Bob, le personnage principal, va être plongé dans le monde quantique et y découvrir de véritables pionniers et piliers de cette théorie tels qu'Albert Einstein, Max Planck et Hugh Everett. Ces derniers vont lui expliquer ce monde par des analogies, des comparaisons et des appuis visuels. Prenons le cas de l'énergie d'une particule ; celle-ci est quantifiable de manière proportionnelle à sa fréquence. Ainsi, pour nous le faire comprendre plus aisément, les auteurs représentent le « quantifiable » en morceaux de sucre cumulables vis-à-vis d'une fréquence élevée.

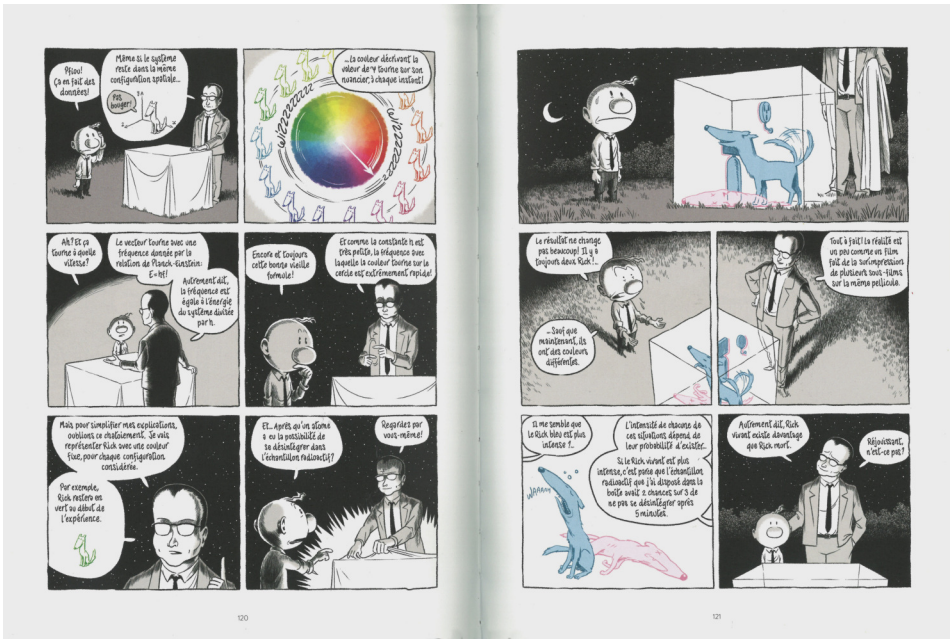


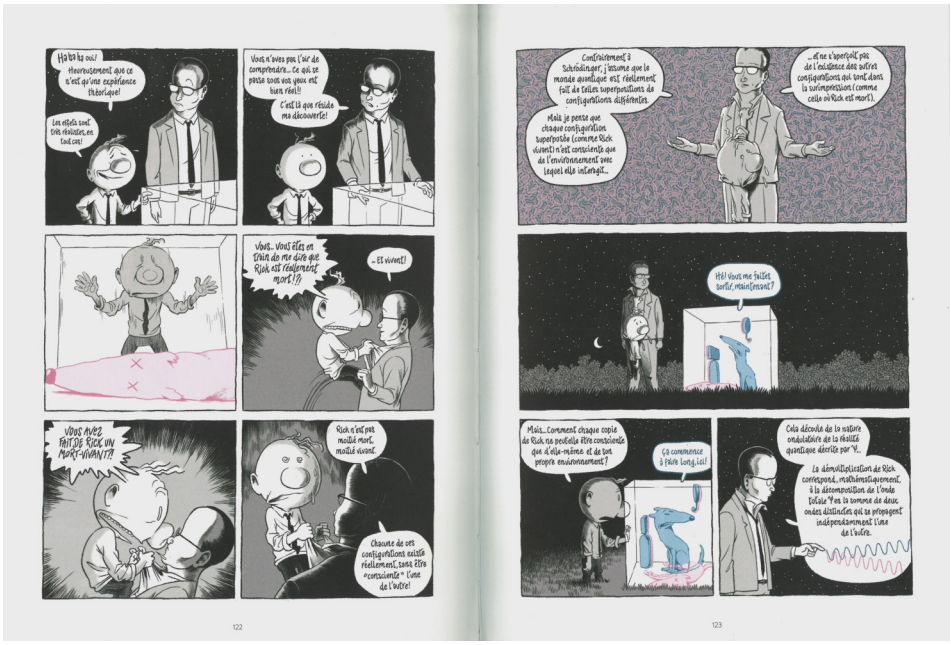
↑ Extrait de la bande dessinée *Le mystère du monde quantique*, Thibault Damour et Mathieu Burniat, scan des pages 26–27, 2016

[43] Damour Thibault et Burniat Mathieu, *Le mystère du monde quantique*, Dargaud, Palaiseau, 2016

[44] Citation de Damour Thibault, « ‹ Le mystère du monde quantique › : quand la BD fait rimer physique avec aventures », *Sciences et Avenir*, mars 2016, repéré à *https://www.sciencesetavenir.fr/sciences/le-mystere-du-monde-quantique-quand-la-bd-fait-rimer-physique-avec-aventures_3174* [consulté le 6 janvier 2023]

Qu'y a-t-il d'autre de notable dans cet ouvrage ? Les appuis visuels didactiques sont colorés ce qui les distingue des illustrations de fond en noir et blanc. Cette utilisation de la couleur est pertinente, car elle concentre l'attention du lecteur sur l'explication visuelle et non sur le reste des illustrations. Vers la fin de l'histoire, nous avons un exemple intéressant de la couleur. Celle-ci est utilisée en couches superposées afin d'illustrer la théorie de Hugh Everett : chaque couleur représente un univers et ses événements. Pour plus de précisions, il nous suffit de regarder les doubles-pages proposées ci-contre. En outre, l'inclusion de quelques équations mères en physique quantique participe à la popularisation des outils mathématiques.







↑ Extrait de la bande dessinée *Le mystère du monde quantique*, Damour Thibault et Burniat Mathieu, scans des pages 120–127, 2016

> *« La bande-dessinée permet à l'enfant d'appréhender plusieurs didactiques différentes, nécessaires à sa bonne compréhension et assimilation »* ***[45]*** .

Nous pouvons supposer que ce principe, donné par le Musée National de l'Éducation, peut également s'appliquer chez l'adulte. Ce support permet une bonne compréhension et acquisition du savoir transmit.

[45] Musée National de l'Éducation, « La bande dessinée comme moyen d'apprentissage », *Réseau Canopé*, 2018, repéré à *https://www.reseau-canope.fr/musee/fileadmin/user_upload/Selection_thematique_BD.pdf* [consulté le 6 janvier 2023]

4.2 – Complémentarité visuelle

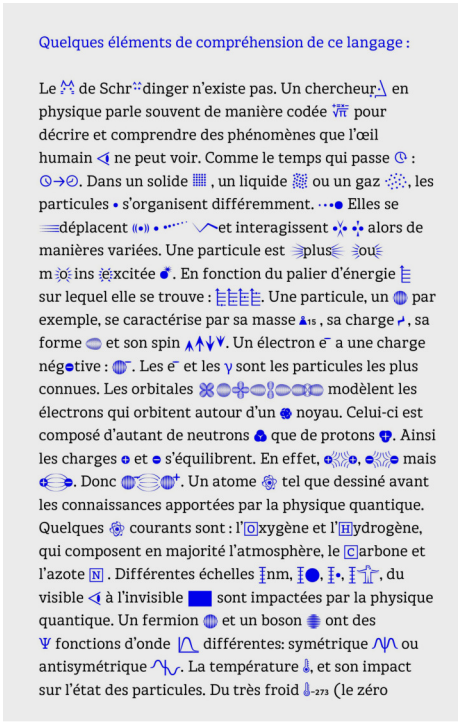
En ce qui touche la complémentarité visuelle, l'exemple le plus parlant de ce corpus est *La quantique autrement* de Julien Bobroff. Il s'agit d'un ouvrage co-créé par ce vulgarisateur scientifique et six spécialistes en design graphique et illustration : Eve Barlier, Héloïse Chochois, Marie Jamon, Marine Joumard, Océane Juvin et le collectif Dafox. La formation des visuels change en fonction de ces derniers, toutefois, l'ensemble parvient à rester harmonieux grâce à un nuancier prédéfinit. En conséquence de cette collaboration, nous obtenons un dynamisme au sein de l'ouvrage et, également, une interprétation différente permettant de faire saisir les concepts de plusieurs façons possibles.
Pour spécifier un peu plus notre propos, prenons un des chapitres comme exemple, soit le dix qui explique des caractéristiques comme le spin [voir 2.1.2] et les différents types de particules [voir 2.2.2].

Ce chapitre-là a été illustré par Océane Juvin d'une façon assez inattendue. Cette dernière a créé une police de caractère illustrative nommée Quantype :

> *« La créatrice de caractères Océane Juvin et le physicien Julien Bobroff se sont associés pour expliquer et raconter la physique quantique et ses enjeux via la création d'une grammaire visuelle et d'un système typographique. Le signe pictural s'intègre dans le discours de vulgarisation pour faciliter la compréhension de concepts difficiles à saisir »* ***[46]*** .

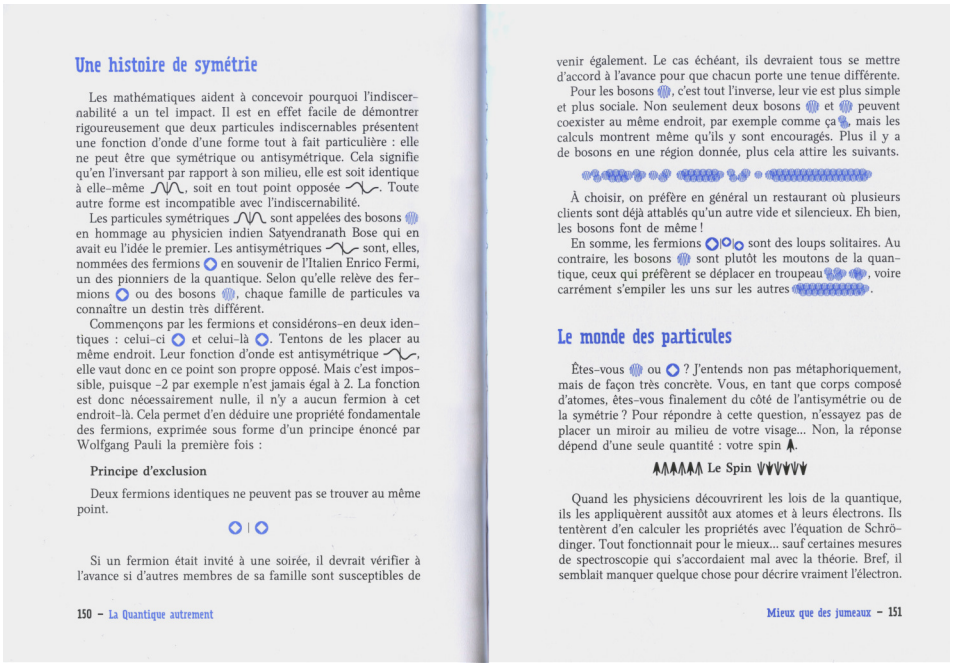
Cette police veut rendre parlant un vocabulaire pointu en utilisant des symboles synthétiques et illustratifs **[r]**.

[r]


Quelques éléments de compréhension de ce langage :

Le de Schr dinger n'existe pas. Un chercheur en physique parle souvent de manière codée pour décrire et comprendre des phénomènes que l'œil humain ne peut voir. Comme le temps qui passe : . Dans un solide , un liquide ou un gaz , les particules s'organisent différemment. Elles se déplacent et interagissent et alors de manières variées. Une particule est plus ou m ins excitée . En fonction du palier d'énergie sur lequel elle se trouve : . Une particule, un par exemple, se caractérise par sa masse , sa charge , sa forme et son spin . Un électron a une charge négative : . Les et les sont les particules les plus connues. Les orbitales modèlent les électrons qui orbitent autour d'un noyau. Celui-ci est composé d'autant de neutrons que de protons . Ainsi les charges et s'équilibrent. En effet, mais . Donc . Un atome tel que dessiné avant les connaissances apportées par la physique quantique. Quelques courants sont : l'Oxygène et l'Hydrogène, qui composent en majorité l'atmosphère, le Carbone et l'azote N . Différentes échelles nm, , du visible à l'invisible sont impactées par la physique quantique. Un fermion et un boson ont des Ψ fonctions d'onde différentes: symétrique ou antisymétrique . La température , et son impact sur l'état des particules. Du très froid (le zéro

↑ « Quantype », Juvin Océane, capture du site *Océane Juvin*, repéré à *http://oceanejuvin.fr/quantype/*


Une histoire de symétrie

Les mathématiques aident à concevoir pourquoi l'indiscernabilité a un tel impact. Il est en effet facile de démontrer rigoureusement que deux particules indiscernables présentent une fonction d'onde d'une forme tout à fait particulière : elle ne peut être que symétrique ou antisymétrique. Cela signifie qu'en l'inversant par rapport à son milieu, elle est soit identique à elle-même , soit en tout point opposée . Toute autre forme est incompatible avec l'indiscernabilité.

Les particules symétriques sont appelées des bosons en hommage au physicien indien Satyendranath Bose qui en avait eu l'idée le premier. Les antisymétriques sont, elles, nommées des fermions en souvenir de l'Italien Enrico Fermi, un des pionniers de la quantique. Selon qu'elle relève des fermions ou des bosons, chaque famille de particules va connaître un destin très différent.

Commençons par les fermions et considérons-en deux identiques : celui-ci et celui-là . Tentons de les placer au même endroit. Leur fonction d'onde est antisymétrique , elle vaut donc en ce point son propre opposé. Mais c'est impossible, puisque –2 par exemple n'est jamais égal à 2. La fonction est donc nécessairement nulle, il n'y a aucun fermion à cet endroit-là. Cela permet d'en déduire une propriété fondamentale des fermions, exprimée sous forme d'un principe énoncé par Wolfgang Pauli la première fois :

Principe d'exclusion

Deux fermions identiques ne peuvent pas se trouver au même point.

Si un fermion était invité à une soirée, il devrait vérifier à l'avance si d'autres membres de sa famille sont susceptibles de

150 – La Quantique autrement

venir également. Le cas échéant, ils devraient tous se mettre d'accord à l'avance pour que chacun porte une tenue différente.

Pour les bosons, c'est tout l'inverse, leur vie est plus simple et plus sociale. Non seulement deux bosons et peuvent coexister au même endroit, par exemple comme ça, mais les calculs montrent même qu'ils y sont encouragés. Plus il y a de bosons en une région donnée, plus cela attire les suivants.

À choisir, on préfère en général un restaurant où plusieurs clients sont déjà attablés qu'un autre vide et silencieux. Eh bien, les bosons font de même !

En somme, les fermions sont des loups solitaires. Au contraire, les bosons sont plutôt les moutons de la quantique, ceux qui préfèrent se déplacer en troupeau, voire carrément s'empiler les uns sur les autres.

Le monde des particules

Êtes-vous ou ? J'entends non pas métaphoriquement, mais de façon très concrète. Vous, en tant que corps composé d'atomes, êtes-vous finalement du côté de l'antisymétrie ou de la symétrie ? Pour répondre à cette question, n'essayez pas de placer un miroir au milieu de votre visage... Non, la réponse dépend d'une seule quantité : votre spin .

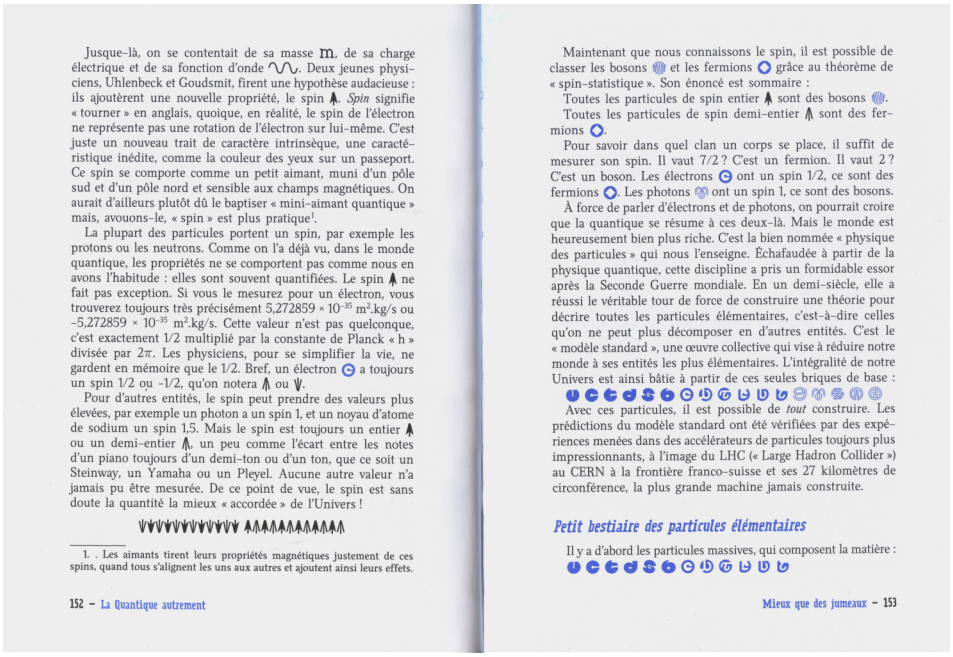
Le Spin

Quand les physiciens découvrirent les lois de la quantique, ils les appliquèrent aussitôt aux atomes et à leurs électrons. Ils tentèrent d'en calculer les propriétés avec l'équation de Schrödinger. Tout fonctionnait pour le mieux... sauf certaines mesures de spectroscopie qui s'accordaient mal avec la théorie. Bref, il semblait manquer quelque chose pour décrire vraiment l'électron.

Mieux que des jumeaux – 151

↑ Extrait de l'ouvrage *La quantique autrement*, Bobroff Julien, scan des pages 150–151, 2020

[46] Juvin Océane, « Quantype », *Océane Juvin*, repéré à *http://oceanejuvin.fr/quantype/* [consulté le 6 janvier 2023]



Jusque-là, on se contentait de sa masse m, de sa charge électrique et de sa fonction d'onde ∿. Deux jeunes physiciens, Uhlenbeck et Goudsmit, firent une hypothèse audacieuse : ils ajoutèrent une nouvelle propriété, le spin. *Spin* signifie « tourner » en anglais, quoique, en réalité, le spin de l'électron ne représente pas une rotation de l'électron sur lui-même. C'est juste un nouveau trait de caractère intrinsèque, une caractéristique inédite, comme la couleur des yeux sur un passeport. Ce spin se comporte comme un petit aimant, muni d'un pôle sud et d'un pôle nord et sensible aux champs magnétiques. On aurait d'ailleurs plutôt dû le baptiser « mini-aimant quantique » mais, avouons-le, « spin » est plus pratique[1].

La plupart des particules portent un spin, par exemple les protons ou les neutrons. Comme on l'a déjà vu, dans le monde quantique, les propriétés ne se comportent pas comme nous en avons l'habitude : elles sont souvent quantifiées. Le spin ne fait pas exception. Si vous le mesurez pour un électron, vous trouverez toujours très précisément $5{,}272859 \times 10^{-35}$ m².kg/s ou $-5{,}272859 \times 10^{-35}$ m².kg/s. Cette valeur n'est pas quelconque, c'est exactement 1/2 multiplié par la constante de Planck « h » divisée par 2π. Les physiciens, pour se simplifier la vie, ne gardent en mémoire que le 1/2. Bref, un électron a toujours un spin 1/2 ou -1/2, qu'on notera ou .

Pour d'autres entités, le spin peut prendre des valeurs plus élevées, par exemple un photon a un spin 1, et un noyau d'atome de sodium un spin 1,5. Mais le spin est toujours un entier ou un demi-entier, un peu comme l'écart entre les notes d'un piano toujours d'un demi-ton ou d'un ton, que ce soit un Steinway, un Yamaha ou un Pleyel. Aucune autre valeur n'a jamais pu être mesurée. De ce point de vue, le spin est sans doute la quantité la mieux « accordée » de l'Univers !

1. . Les aimants tirent leurs propriétés magnétiques justement de ces spins, quand tous s'alignent les uns aux autres et ajoutent ainsi leurs effets.

Maintenant que nous connaissons le spin, il est possible de classer les bosons et les fermions grâce au théorème de « spin-statistique ». Son énoncé est sommaire :

Toutes les particules de spin entier sont des bosons.

Toutes les particules de spin demi-entier sont des fermions.

Pour savoir dans quel clan un corps se place, il suffit de mesurer son spin. Il vaut 7/2 ? C'est un fermion. Il vaut 2 ? C'est un boson. Les électrons ont un spin 1/2, ce sont des fermions. Les photons ont un spin 1, ce sont des bosons.

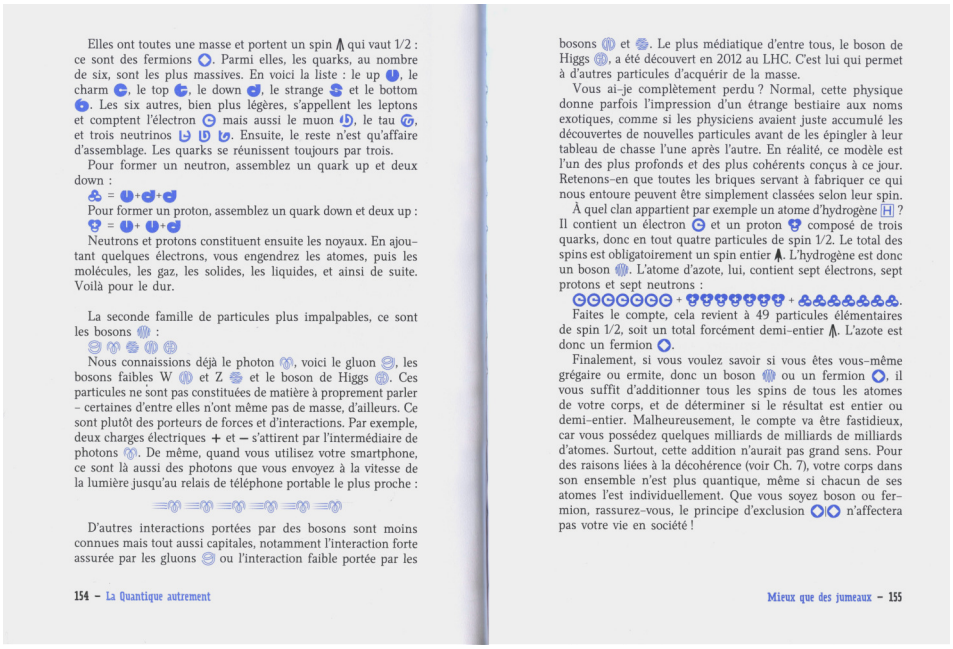
À force de parler d'électrons et de photons, on pourrait croire que la quantique se résume à ces deux-là. Mais le monde est heureusement bien plus riche. C'est la bien nommée « physique des particules » qui nous l'enseigne. Échafaudée à partir de la physique quantique, cette discipline a pris un formidable essor après la Seconde Guerre mondiale. En un demi-siècle, elle a réussi le véritable tour de force de construire une théorie pour décrire toutes les particules élémentaires, c'est-à-dire celles qu'on ne peut plus décomposer en d'autres entités. C'est le « modèle standard », une œuvre collective qui vise à réduire notre monde à ses entités les plus élémentaires. L'intégralité de notre Univers est ainsi bâtie à partir de ces seules briques de base :

Avec ces particules, il est possible de *tout* construire. Les prédictions du modèle standard ont été vérifiées par des expériences menées dans des accélérateurs de particules toujours plus impressionnants, à l'image du LHC (« Large Hadron Collider ») au CERN à la frontière franco-suisse et ses 27 kilomètres de circonférence, la plus grande machine jamais construite.

Petit bestiaire des particules élémentaires

Il y a d'abord les particules massives, qui composent la matière :

↑ Extrait de l'ouvrage *La quantique autrement*, Bobroff Julien, scan des pages 152–153, 2020



Elles ont toutes une masse et portent un spin qui vaut 1/2 : ce sont des fermions. Parmi elles, les quarks, au nombre de six, sont les plus massives. En voici la liste : le up, le charm, le top, le down, le strange et le bottom. Les six autres, bien plus légères, s'appellent les leptons et comptent l'électron mais aussi le muon, le tau, et trois neutrinos. Ensuite, le reste n'est qu'affaire d'assemblage. Les quarks se réunissent toujours par trois.

Pour former un neutron, assemblez un quark up et deux down :

= + +

Pour former un proton, assemblez un quark down et deux up :

= + +

Neutrons et protons constituent ensuite les noyaux. En ajoutant quelques électrons, vous engendrez les atomes, puis les molécules, les gaz, les solides, les liquides, et ainsi de suite. Voilà pour le dur.

La seconde famille de particules plus impalpables, ce sont les bosons :

Nous connaissions déjà le photon, voici le gluon, les bosons faibles W et Z et le boson de Higgs. Ces particules ne sont pas constituées de matière à proprement parler – certaines d'entre elles n'ont même pas de masse, d'ailleurs. Ce sont plutôt des porteurs de forces et d'interactions. Par exemple, deux charges électriques + et – s'attirent par l'intermédiaire de photons. De même, quand vous utilisez votre smartphone, ce sont là aussi des photons que vous envoyez à la vitesse de la lumière jusqu'au relais de téléphone portable le plus proche :

D'autres interactions portées par des bosons sont moins connues mais tout aussi capitales, notamment l'interaction forte assurée par les gluons ou l'interaction faible portée par les

bosons et . Le plus médiatique d'entre tous, le boson de Higgs, a été découvert en 2012 au LHC. C'est lui qui permet à d'autres particules d'acquérir de la masse.

Vous ai-je complètement perdu ? Normal, cette physique donne parfois l'impression d'un étrange bestiaire aux noms exotiques, comme si les physiciens avaient juste accumulé les découvertes de nouvelles particules avant de les épingler à leur tableau de chasse l'une après l'autre. En réalité, ce modèle est l'un des plus profonds et des plus cohérents conçus à ce jour. Retenons-en que toutes les briques servant à fabriquer ce qui nous entoure peuvent être simplement classées selon leur spin.

À quel clan appartient par exemple un atome d'hydrogène H ? Il contient un électron et un proton composé de trois quarks, donc en tout quatre particules de spin 1/2. Le total des spins est obligatoirement un spin entier. L'hydrogène est donc un boson. L'atome d'azote, lui, contient sept électrons, sept protons et sept neutrons :

+ + .

Faites le compte, cela revient à 49 particules élémentaires de spin 1/2, soit un total forcément demi-entier. L'azote est donc un fermion.

Finalement, si vous voulez savoir si vous êtes vous-même grégaire ou ermite, donc un boson ou un fermion, il vous suffit d'additionner tous les spins de tous les atomes de votre corps, et de déterminer si le résultat est entier ou demi-entier. Malheureusement, le compte va être fastidieux, car vous possédez quelques milliards de milliards de milliards d'atomes. Surtout, cette addition n'aurait pas grand sens. Pour des raisons liées à la décohérence (voir Ch. 7), votre corps dans son ensemble n'est plus quantique, même si chacun de ses atomes l'est individuellement. Que vous soyez boson ou fermion, rassurez-vous, le principe d'exclusion n'affectera pas votre vie en société !

↑ Extrait de l'ouvrage *La quantique autrement*, Bobroff Julien, scan des pages 154–155, 2020

Des petits pictogrammes servent d'intermédiaires visuelles à l'intérieur même du texte. Comme une police complémentaire à celle de labeur, celle-ci vient représenter ce qui est expliqué dans le chapitre. Si nous reprenons l'exemple du spin, ici, il est représenté comme une flèche en fonction de son type [voir 2.1.2]. Est-ce une solution à l'inclusion controversée des outils mathématiques dans les objets de vulgarisation et de design ? Malgré un risque d'interruption dans le rythme de lecture, cette innovation peut être envisagée comme une langue graphique complémentaire aux autres tant utilisées.

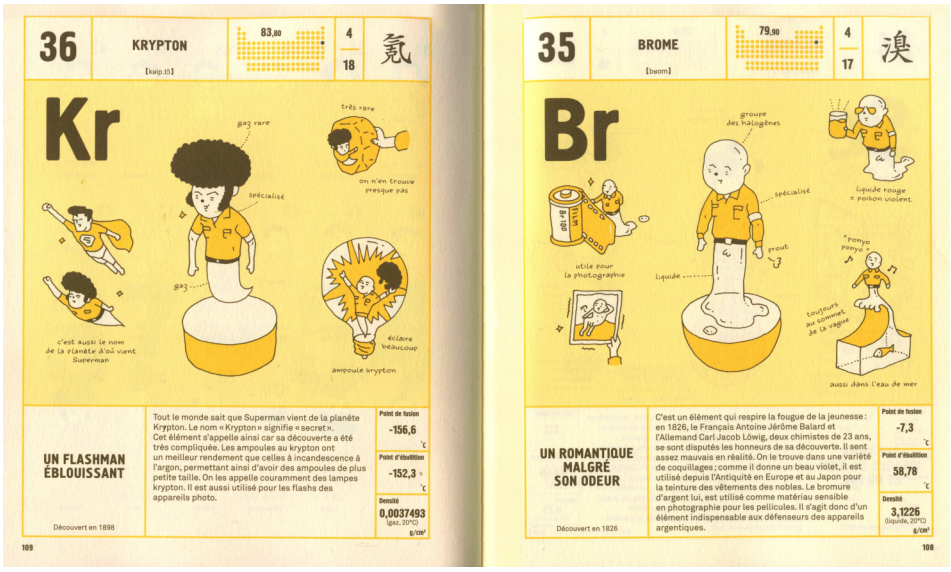
[s]



↑ Extrait de l'ouvrage illustré *La vie merveilleuse des éléments*, Yorifuji Bunpei, image du « super tableau périodique » sur le site *Édition B42*, 2017. **Note : Ce poster n'a pas été réédité dans le livre depuis son ancienne version en 2009, mais est disponible à part. Néanmoins, il a été complété, car il contient les derniers éléments découverts comme le nihonium.**

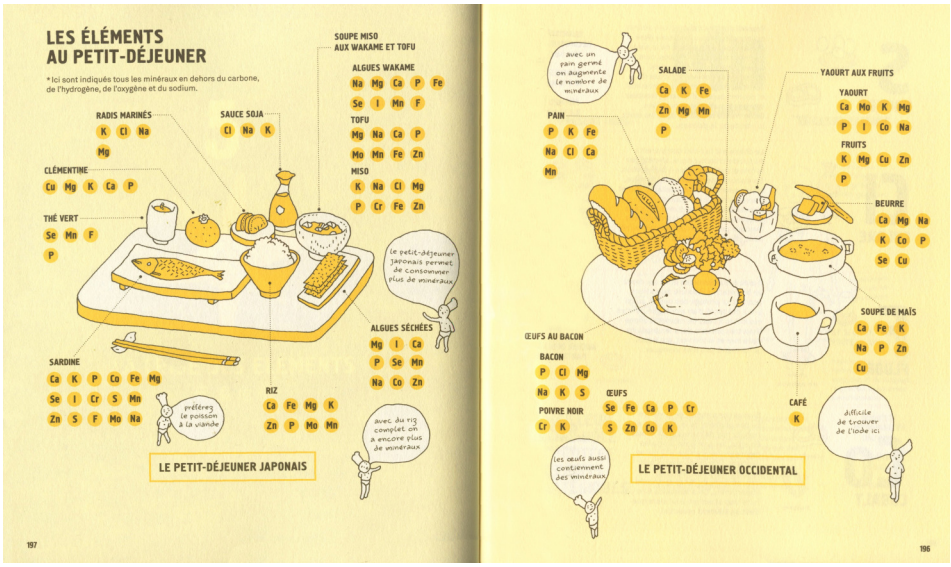
4.3 – Personnifier des atomes

Si nous regardons un tableau de Mendeleïev, nous nous souvenons alors de nos cours de sciences et, pour beaucoup, une incompréhension de cette classification. Par l'illustration, Bunpei Yorifuji avec *La vie merveilleuse des éléments* nous propose de *(re)*découvrir ce tableau de manière amusante et pédagogique **[s]**. Réédité en 2017 et réimprimer en 2023 par les Édition B42, cet ouvrage nous présente chaque élément tel un personnage à part entière avec des caractéristiques physiques en fonction de ce qu'il représente. Prenons un exemple : le bas du corps de chaque personnage est pensé et répété en fonction de son élément. Si ce dernier est un gaz alors son corps se termine tel un fantôme. S'il a des jambes, il est solide. De même que s'il porte un tablier, il est présent dans notre quotidien. Alors que s'il est entouré d'un halo de lumière, il est luminescent.



↑ Extrait de l'ouvrage illustré *La vie merveilleuse des éléments*, Yorifuji Bunpei, scan des pages 108–109, 2017

Nous pouvons observer ci-contre que l'illustrateur fait référence à Superman pour l'élément Krypton — étant aussi le nom de la planète d'origine du héros. Ses éléments-personnages possèdent un grand nombre de détails amusant et décalé permettant une pédagogie plus apprécié du lecteur. D'autres parties du livre sont également notables.



↑ Extrait de l'ouvrage illustré *La vie merveilleuse des éléments*, Yorifuji Bunpei, scan des pages 196–197, 2017

C'est le cas pour « les éléments du petit-déjeuner » ; cette partie décompose un plateau de nourriture en des éléments qu'il constitue. En outre, l'illustrateur japonais effectue un parallèle entre le macroscopique et le microscopique. Nous pouvons en déduire que cela permet de concrétiser le monde quantique qui nous semble si abstrait et lointain.

> *« [...] Et puis, en observant une table, difficile de se dire que du carbone se trouve en face de soi. »* ***[47]***

4.4 – Concrétiser les échelles

Pour l'instant, nous n'avons étudié que des objets éditoriaux de plusieurs types tels que magazine, bande dessinée, manuel scolaire ou livre illustré. Toutefois, il existe d'autres supports à des fins de vulgarisations scientifiques. Prenons le cas de l'application *Système Solaire Astrocat* créée par Minilab Studios en 2015. Destinée aux enfants, son objectif est de leur faire apprendre le système solaire grâce à des quiz et des explorations **[t]**. Si nous retournons à la théorie quantique, nous avons le cas de l'animation d'Arène Charlotte et Loncin Rosalie nommée *Le Nobel chevelu* et réalisée dans le collectif La physique autrement en 2019 **[u]** **[v]**.

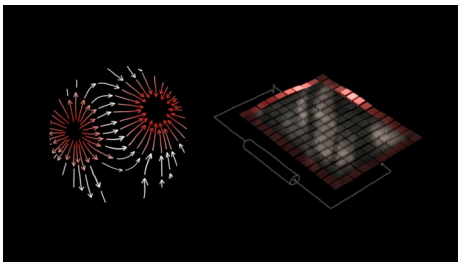
Afin d'ouvrir nos axes sur cette étude de cas, nous allons étudier un nouveau support : un film documentaire commandé par IBM et créé par Ray et Charles Eames, couple de designers, en 1977. Il s'agit de *Power of ten*. Signifiant puissance de dix en anglais, le principe même est d'agrandir ou de rétrécir le champ de vision à la puissance de dix toutes les dix secondes.
Nous commençons à l'échelle macroscopique avec un homme et une femme achevant un pique-nique. La caméra qui les filme puis va prendre du recul progressivement et s'éloigner vers le haut. Au fur et à mesure, nous arrivons aux limites observables de l'univers. C'est par la suite que nous passerons à l'échelle quantique avec un rapprochement de la caméra pour voir, cette fois, le plus petit élément connu : le quark (à cette époque). En neuf minutes, nous sommes passés de l'échelle 10^{24} à 10^{-16}.

[t]

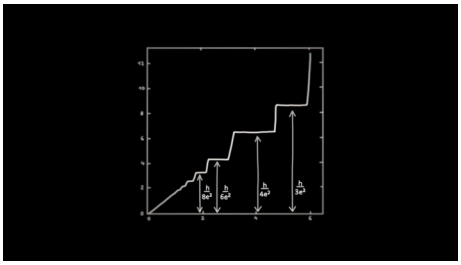


↑ *Système Solaire Astrocat*, image de l'application du site *Les Numériques*, repéré à *https://app-enfant.fr/application/professeur-astrocat-ipad-iphone/* [consulté le 14 janvier 2023]

[u]

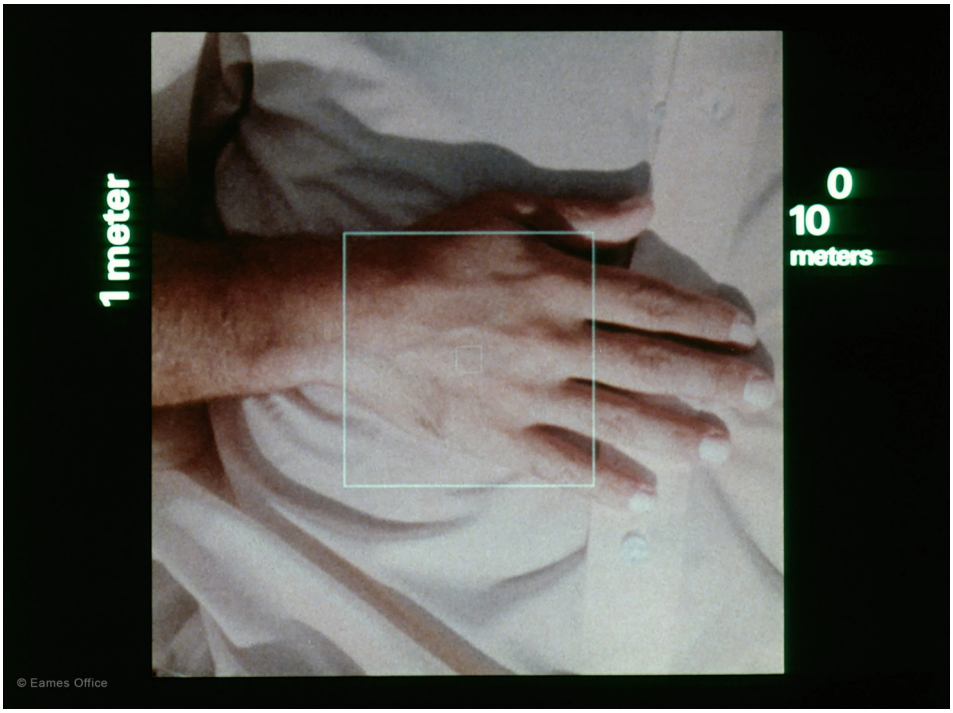


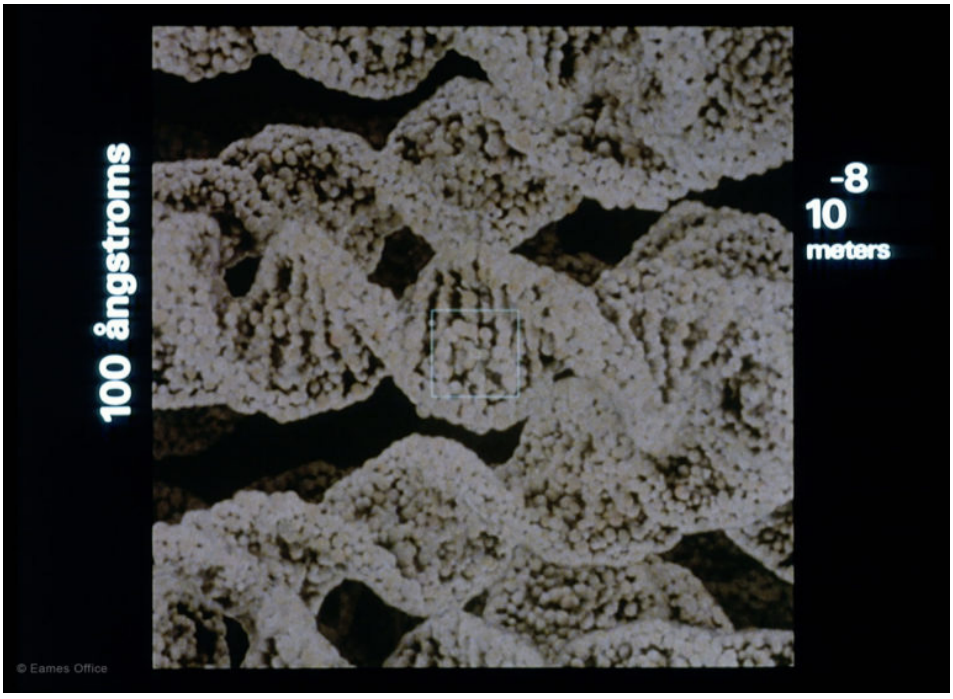
[v]

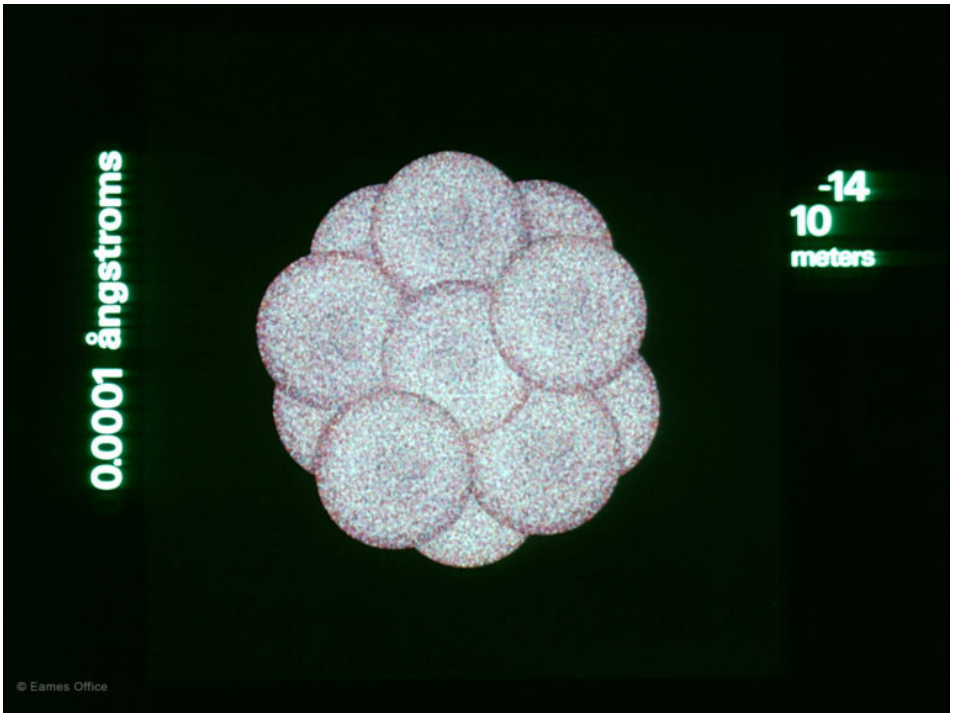


↑ *Le Nobel chevelu*, images de la vidéo sur le site *La physique autrement*, repéré à *https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/projet/le_nobel_chevelu/* [consulté le 14 janvier 2023]

[47] Citation dans « LA VIE MERVEILLEUSE DES ÉLÉMENTS », *Éditions B42*, repéré à *https://editions-b42.com/produit/la-vie-merveilleuse-des-elements/* [consulté le 13 janvier 2023]


1 meter
0
10
meters
© Eames Office


100 ångstroms
-8
10
meters
© Eames Office



↑ *Power of ten*, Eames Ray et Charles, images/captures du documentaire du site *Eames Office*, repéré à *https://www.eamesoffice.com/the-work/powers-of-ten/*

Si nous préservons pour une brève description uniquement l'échelle quantique, nous obtenons la caméra filmant la main, l'épiderme, le collagène, un lymphocyte, les chromosomes et l'ADN, les atomes, les électrons et enfin évoque les quarks d'un proton du noyau. Après toutes ces informations, que pouvons-nous en déduire ? Le film nous montre concrètement toutes les échelles auxquelles nous pouvons accéder. Il s'agit également de pouvoir populariser un savoir scientifique grâce à l'étonnement et l'émerveillement. La science-fiction utilise souvent ce procédé — nous pouvons citer *Avatar* **[48]** avec l'inclusion de la biologie dans les paysages ou *Interstellar* **[49]** avec l'application de principes physique impressionnant. *Power of ten* reste ancien comparé aux exemples précédents ; les savoirs sont donc à actualiser.

5.0 – Conclusion

En définitive, qu'avons-nous appris ? Savons-nous en quoi la langue graphique complémentarise les outils mathématiques en physique quantique ? Et en quoi le design graphique peut s'y introduire et résoudre son indicibilité ? Nous avons décrit les divers problèmes et solutions à travers nos études des cas et axes qui les composent. Nous avons également pu situer la place et les caractéristiques de la langue graphique sur les trois pôles distincts des scientifiques, des vulgarisateurs et des designers graphiques. Les exemples illustrant ces pôles nous ont permis de déduire les principes nécessaires à l'inclusion d'un lecteur. Après toutes ces informations, nous pouvons conclure qu'il est important de nourrir un projet avec les capacités complémentaires des spécialistes d'horizons des trois pôles. Car, finalement, l'objectif premier d'une œuvre de vulgarisation scientifique en physique quantique est d'attiser l'attrait du lecteur tout en conservant l'aspect pédagogique et didactique. Grâce à nos observations, nous avons vu qu'il est rare d'avoir un projet introduisant les outils mathématiques.

[48] Cameron James, *Avatar*, 20th Century Fox, 2009
[49] Nolan Christophe, *Interstellar*, Warner Bros., 2014

Ils ne doivent pas être un frein et être remplacé par la langue graphique, mais doit se complémentariser avec elle. Notre prochain questionnement sera alors de savoir comment la langue graphique peut inclure les outils mathématiques afin de les populariser ?

Emma Martin

Quels sont vos parcours d'études et professionnels ?

Bruno Mendiboure

J'ai fait des études classiques à l'université en physique jusqu'à la maîtrise, puis un DEA (diplôme d'études approfondies) de physique-chimie et un doctorat de physique. Je suis aujourd'hui maître de conférence, enseignant chercheur ou universitaire, tout dépend du terme, à l'UPPA (Université de Pau et des Pays de l'Adour).

EM **Quel est votre domaine de recherche ?**

BM En ce moment — car ça peut changer — ce sont les hydrates de gaz, qui sont une problématique aujourd'hui. Ce sont des systèmes qui peuvent stocker les gaz à effet de serre. Moi, je ne fais que du calcul. Je ne suis pas expérimentateur, je fais des simulations et travaille avec quatre collègues qui sont en Espagne. Nous essayons de calculer une propriété qui est remarquable lorsqu'on étudie des systèmes complexes. C'est-à-dire des systèmes où nous mélangeons, par exemple, de l'eau et de l'huile (ici, un système complexe assez simple). Elle se nomme la tension interfaciale. Donc, nous avons mis au point un protocole de simulation, en quelque sorte, qui permet de déterminer la tension interfaciale d'hydrates. Pour l'instant, ça marche. Nous arrivons à avoir une valeur calculée qui est en relation avec la valeur expérimentale. Avant ça, je m'intéressais toujours à la tension interfaciale. Mais je la déterminais par d'autres méthodes de calculs, dans d'autres systèmes. Notamment des systèmes complexes qui étaient confinés dans des pores nanométriques, nous pourrions parler ici de gaz, de CO2 ou de méthane. Il faut savoir que lorsqu'il est piégé, ce gaz-là, au contact de la roche, il se distribue de façon assez étrange. Il peut être collé contre le pore et laisser un vide. Il y a toute une théorie en physique statistique qui donne des équations que je manipulais et qui permettaient de regarder ce qu'il se passait dans ce pore-là. Par contre, pour mon premier sujet d'étude, quand j'ai passé ma thèse, c'était sur la modélisation de la fabrication des émulsions routières.

EM **Avez-vous déjà participé à des projets utilisant la vulgarisation scientifique ?**

BM Non, hormis pour l'enseignement.

EM **Avez-vous déjà dû faciliter votre travail à vos collègues scientifiques (de votre ou d'autres disciplines) ?**

BM Il m'est arrivé de parler avec une personne, un collègue qui étudiait un champ de recherche différent du mien. Toutefois, nous nous retrouvions et nous nous expliquions. Cela pouvait être aussi avec des mathématiques : nous nous écrivions des équations au tableau. Nous arrivions à nous comprendre entre disciplines.

EM **Tenez-vous un cahier de laboratoire contenant des notes sur votre travail ?**

BM Non, je n'utilise que mon ordinateur et des feuilles. Je fais souvent des feuilles manuscrites, je réécris couramment mes cours. Pendant la période du Covid, avec les cours à distance, je scannais mes feuilles.

EM **Avez-vous déjà publié votre travail ? Si oui, à qui cela s'adresse et facilitez-vous vos écrits ?**

BM Oui, cette année, nous avons fait trois publications sur les hydrates de gaz. Toutefois, je ne m'adresse qu'à des spécialistes, par conséquent, je ne facilite pas.

EM **Que pensez-vous de la physique quantique ?**

BM Pour moi, la physique quantique est un monde merveilleux. Je l'enseigne, mais je ne suis pas vraiment un spécialiste. Eux, l'enseignent et la travaillent en recherche. Si j'avais pu faire de la physique quantique en recherche, ce serait merveilleux. Mais à Pau, nous ne pouvons pas le faire, il faut aller à Bordeaux, à Paris. Moi, je n'ai jamais voulu quitter les Pyrénées. Donc, j'ai appris la physique quantique tout seul. On me l'a enseigné quand j'étais en troisième année, mais je n'ai eu que cet enseignement-là. Quand j'ai fini mon doctorat et que je suis devenu enseignant chercheur, j'ai pu avoir certaines libertés et j'ai commencé à l'apprendre pendant un certain nombre d'années. Finalement, quand le professeur qui l'enseignait à l'université est parti sur Anglet, il a fallu le remplacer et je me suis décidé à le faire. Je l'enseigne depuis quatre ou cinq ans maintenant, je pense. Et d'ailleurs, je continue à l'étudier.

EM **Que pensez-vous des mathématiques ?**

BM Si je devais tout recommencer, je penses que je m'inscrirais en mathématiques. Par contre, je ne ferais que des mathématiques pour la physique. Pour moi, c'est mon passe-temps favori. D'ailleurs, j'enseigne les outils mathématiques pour la physique. Il n'y a rien à voir avec les mathématiques des mathématiciens. Il s'agit des outils mathématiques quand ils sont liés à la physique.

EM **Pensez-vous que la physique quantique peut se rattacher à la culture populaire ? Et pourquoi ?**

BM Quand nous parlerons d'ordinateur quantique, si un jour, nous arrivons à en fabriquer, forcément que tout le monde devra savoir ce qu'on peut faire avec ça et en parler. Mais après, je ne pense pas que ça soit populaire. Nous allons réduire les filtres : est-ce qu'un étudiant pourrait en parler ? Je pense qu'un étudiant en sciences, peu importe le domaine, doit connaître un minimum de physique quantique. En-tout-cas, dans sa culture à lui. Après, je ne sais pas, est-ce que ma sœur qui est institutrice a besoin de savoir ? Quand on fabrique des microprocesseurs, on a besoin de la physique quantique ou encore en application médicale avec l'IRM. Cela fait partie de cette culture, en tout cas.

EM **Selon vous, qu'est-ce qui rend la physique quantique trop complexe pour la culture populaire ?**

BM Les mathématiques.

EM **Les mathématiques sont-ils un langage complexe ? Si oui, qu'est-ce qui les rendent complexes ?**

BM « Je pense que la vie est complexe avec une partie réelle et une partie imaginaire. » C'était un physicien en théorie des groupes qui disait ça. Forcément, les mathématiques vont décrire un peu tout finalement. Ils sont là, devant nous, mais il faut aller les chercher. Après, les mathématiques de la relativité sont encore plus complexes. Le formalisme lui-même est complexe : il a des indices en haut, en bas, avec leurs propriétés — ce que nous n'avons pas en quantique. Par exemple, le formalisme de la dualité onde-corpuscule est largement plus simple que la relativité générale. Alors, la relativité restreinte, est assez simple, mais dès que nous faisons de la relativité générale, nous avons des objets avec des indices et ça peut être compliqué : il faut de la place sur le tableau pour écrire les équations. Après, en cosmologie, on peut avoir des équations très simples. Si vous ouvrez quelques livres de cosmologie, vous allez

voir que c'est peu compliqué. Il y a des petites relations qui essayent de prévoir/prédire l'évolution de l'univers, mais c'est assez simple.

EM **Pensez-vous que le langage visuel est complémentaire au langage mathématique ?**

BM Oui, c'est certain. Cela peut rendre plus parlant, intéressant et attrayant. Il existe, en mathématiques, des visuels qui expliquent les théories. Mais en physique, il n'y a que Penrose qui le fait.

EM **Pensez-vous que le design puisse trouver des solutions aux problèmes de communication entre la culture populaire et la physique quantique ?**

BM Oui, pourquoi pas. Dans un monde idéal, c'est certain.

Il est conseillé de consulter le glossaire en parallèle de la lecture. Ainsi, il sera plus aisé de la comprendre.

Boson
Type de particules qui composent les forces/interactions fondamentales. Elles disposent d'un spin nul ou entier.

Calabi-Yau
Formalisme de supercordes (voir théorie des supercordes) à dix dimensions.

Condensat de Bose-Einstein
Effet ondulatoire produit à très basse température. Les ondes de bosons s'assemblent pour former une seule et immense onde.

Constante de Dirac
Remaniement de la constante de Planck, aussi appelée constante de Planck réduite notée $\hbar = h/2\pi$. $\hbar$ désigne le moment angulaire, y compris le spin. $\hbar$ est également utilisée dans le principe d'incertitude d'Heisenberg. Pour cette raison, certains pensent que $\hbar$ est plus fondamental que h. $\hbar$ est employé pour définir les unités de Planck.

Constante de Planck
Notée h où $h = 6{,}62607015 \times 10^{-34}$ m^2 kg/s. La constante est utilisée pour décrire la taille des quanta reliant notamment l'énergie d'un photon à sa fréquence : $E = hv$

Diagramme de Feynman
Schéma traduisant les interactions entre les particules.

Dualité onde-corpuscule
Principe fondamental de la physique quantique. Une particule, soit un corpuscule, peut montrer un comportement ondulatoire. De même qu'une onde peut montrer des caractéristiques corpusculaires. Exemple : deux expériences différentes ont montré ce résultat pour la lumière. La lumière n'est pas localisée quand elle traverse des fentes, pourtant elle est faite de paquets corpusculaires nommés photon.

Effet tunnel
Phénomène en physique quantique désignant le passage d'une particule à travers une cloison.

Électron
Particule portant une charge électrique négative, faisant partie de la famille des fermions.

Fermion
Type de particule au spin demi-entier formant la matière.

Forces/Interactions fondamentales
Action des particules déterminant les forces qui les lient, modifient leurs états ou les transforment. Le terme interaction a tendance à être plus utilisé aujourd'hui, étant plus correcte que le terme force. Toutefois, ce dernier semble rester dans les usages. Actuellement, il existe quatre interactions connues : l'interaction électromagnétique, l'interaction forte, l'interaction faible et l'interaction gravitationnelle.

Gravitation quantique à boucles
Théorie cherchant à associer la gravité et la physique quantique. Elle utilise les réseaux de spins afin de formaliser la structure possible de l'espace-temps.

Hiatus
Au figuré, il s'agit d'une coupure, discontinuité ou interruption.

Intrication quantique
Aussi nommé enchevêtrement quantique, l'intrication montre un phénomène permettant de lier deux particules. Ainsi, une des particules peut recevoir les informations données à l'autre.

Lymphocyte
Cellule du système immunitaire, responsable des réactions de défense de l'organisme contre les substances qu'il considère comme étrangères.

Modèle standard de la physique des particules
Théorie en physique quantique décrivant les différents types de particules ainsi que leurs interactions.

Moment cinétique ou angulaire
Grandeur utilisée pour décrire l'état de rotation d'un système physique.

Onde
Perturbation ou vibration se propageant dans l'espace. En physique, une onde associée à un corps quantique (particules) est appelé onde de Broglie.

Orbitale Atomique
Schéma du passage probabiliste d'un électron, aussi nommé nuage électronique. L'état d'un électron est montré par un volume de l'espace autour du noyau dans lequel il est délocalisé.

Outils mathématiques
Terme pour signifier des mathématiques utilisées en physique spécifiquement.

Particule
Une particule est un corpuscule, soit une petite parcelle de matière, composant notre univers. Elle est a différencier du *quantum* (ou *quanta*) qui est une mesure de quantité et non un corps infinitésimal.

Photon
Particule composant la lumière. Faisant partie des bosons, son flux constitue la force électromagnétique, une des quatre forces/interactions fondamentales.

Physique quantique
Piliers de la physique contemporaine, il s'agit d'une discipline étudiant les lois de l'échelle infinitésimal, sub*(sous)*-atomique. Le terme quantique provient des *quanta* (pluriel de *quantum* et dérivé de *quantus* qui signifie *combien*), soit des paquets quantifiables d'énergie.

Point d'interaction
Dans un diagramme de Feynman, un point d'interaction montre un instant où les particules interagissent de différentes manières possibles (émission, annihilation, transformation), schématisées par un point.

Positon
Antiparticule de l'électron, possédant la même masse et même spin. Cependant, le positon, aussi appelé antiélectron, est de charge électrique positive (de + 1). Il s'agit de la première antiparticule découverte.

Principe d'incertitude d'Heisenberg
Principe élémentaire en physique quantique démontrant qu'une particule ne peut avoir une mesure précise sur sa vitesse et sur sa position. Plus l'une des mesures est précise, moins l'autre l'est.

Profane
Celui qui n'est pas initié à un art ou à une science.

Proton
Particule portant une charge électrique positive se situant dans le noyau d'un atome.

Quantiquement
Relatif au terme quantique.

Quarks
Particules élémentaires constituant la matière.

Réseau de spin
Système formant un ensemble de spins, représentant la structure quantique de la gravitation quantique à boucle.

Rhizome
Repris par Gilles Deleuze et Félix Guattari, ce concept désigne une structure évoluant en permanence dans toutes les directions, dénuée de niveaux.

Spin
Propriété analogue à une rotation (spin venant de l'anglais tourner sur soi-même). Il désigne le moment cinétique, ou angulaire, d'une particule, chacune possédant un spin propre. Les fermions ont des spins demi-entiers, tandis que les bosons ont des spins nuls ou entiers. Il peut être annoté ainsi : 0 (nul), 1/2 (demi-entier), 1 (entier), 3/2, 2, 5/2, 3, etc.

Spin total
Valeur d'un ensemble de spin formant un système.

Superposition d'états
Principe en physique quantique disant qu'une particule peut être en différents états à la fois. Il peux s'agir de position ou de vitesse.

Tableau de Mendeleïev
Aussi appelé tableau périodique des éléments, ce tableau classifie les éléments chimiques, soit des associations d'atomes identiques.

Théorie des supercordes
Théorie cherchant à associer la gravité et la physique quantique. Les particules sont considérées comme des cordes (ouvertes ou fermées) vibrant de manière propre. Chaque vibration constitue une particule différente. Les supercordes sont des cordes dont les spin ont été considérés. Les variétés de Calabi-Yau sont le formalisme de cette théorie.

Théorie des twisteurs
Théorie élaborée par Roger Penrose dans les années 1970 cherchant à associer la gravité et la physique quantique.

Vision Doxique
Relatif à la Doxa, soit un ensemble de préjugés et présuppositions dans une culture donnée.

AICHER Olt, *Le monde comme projet*, Éditions B42, Paris, 2015

ALTER Anna, « Le plus grand paradoxe de l'astronomie est désormais dépassé », *Atlantico*, novembre 2020, repéré à *https://atlantico.fr/article/decryptage/le-plus-grand-paradoxe-de-l-astronomie-est-desormais-depasse-galaxie-espace-trous-noirs-recherche-etude-scientifique-anna-alter* [consulté le 16 décembre 2022]

BASDEVANT Jean-Louis, *15 leçons de mécanique quantique*, Deboeck supérieur, Paris, 2019

BELANGER Marco et Riopel Martin, *Intervenir sur les langages en mathématiques et en sciences*, Modulo, Aout 2007

BOBROFF Julien, *La quantique autrement*, Flammarion, Villeneuve-d'Ascq, 2020

BOISSON Thomas, « Des physiciens révèlent la toute première image de l'intrication quantique entre deux particules », *Trust my science*, 2019, repéré à *https://trustmyscience.com/premiere-image-intrication-quantique-entre-photons/* [consulté le 4 janvier 2023]

BONTEMS Vincent et LEHOUQ Roland, *Les idées noires de la physique*, Les belles lettres, Paris, 2016

BUTTERWORTH Jon, *Atom Land : voyage dans le monde étrange (et incroyablement petit) de la physique des particules*, édition Quanto, 2018

CAMERON James, *Avatar*, 20th Century Fox, 2009

CLARAGE Jim, « Lecture 12, The Big Bang and Cosmology », *University of Huston*, 2008, repéré à *https://uh.edu/~jclarage/astr3131/lectures/12/cern_bubblechamber.jpg* [consulté le 15 janvier 2023]

CNRTL (Centre national de ressources textuelles et lexicales), Portail lexical, repéré à *https://www.cnrtl.fr/portail/* [consulté le 19 octobre 2022]

DAMOUR Thibault et BURNIAT Mathieu, *Le mystère du monde quantique*, Dargaud, Palaiseau, 2016

DUTRIEUX Lionel, « De quelles manières la mise en page et la présentation graphique des manuels scolaires peuvent-elles aider le jeune en apprentissage ? », *Medium*, 2016, repéré à *https://medium.com/liove/de-quelles-manières-la-mise-en-page-et-la-présentation-graphique-des-manuels-scolaires-peuvent-1afdca651ea2* [consulté le 6 janvier 2023]

EAMES Ray et Charles, *Power of ten*, IBM (International Business Machines Corporation), 1977

EAST Richard, « Physique formelle de spin diagrammatique », *HAL*, 2022, repéré à *https://theses.hal.science/tel-03719945* [consulté le 11 janvier 2023]

Encyclopædia Universalis, repéré à *https://www.universalis.fr/encyclopedie/* [consulté le 13 novembre 2022]

FERRANDO María-García, Sergi, Albert, CONEJERO J. Alberto, FERNÁNDEZ DE CÓRDOBA Pedro et ÁNGEL GARCÍA-MARCH Miguel, « A Method for the Dynamics of Vortices in a Bose-Einstein Condensate: Analytical Equations of the Trajectories of Phase Singularities », *MDPI*, janvier 2023, repéré à *https://doi.org/10.3390/condmat8010012* [consulté le 9 novembre 2023]

HANSON Andrew J., « Espace Calabi-Yau », *Wolfram Demonstrations Project*, mars 2011, repéré à *http://demonstrations.wolfram.com/CalabiYauSpace/* [consulté le 11 janvier 2023]

IBM (International Business Machines Corporation), *A Boy And His Atom : The World's Smallest Movie*, avril 2013, repéré à *https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0* [consulté le 16 janvier 2023]

JUVIN Océane, « Quantype », *Océane Juvin*, repéré à *http://oceanejuvin.fr/quantype/* [consulté le 6 janvier 2023]

La physique autrement, « Le Nobel chevelu », *Youtube*, octobre 2019, repéré à *https://www.youtube.com/watch?v=iHPZ7TL9npU* [consulté le 14 janvier 2023]

« LA VIE MERVEILLEUSE DES ÉLÉMENTS », *Éditions B42*, repéré à *https://editions-b42.com/produit/la-vie-merveilleuse-des-elements/* [consulté le 13 janvier 2023]

LEFEBVRE Muriel, « L'ambivalence des mathématiciens face à l'image », *Communication & langages*, *HAL*, 2003, repéré à *https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic_00001392/document* [consulté le 21 octobre 2022]

« Le Nobel chevelu », *La physique autrement*, repéré à https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/projet/le_nobel_chevelu/ [consulté le 14 janvier 2023]

LÉVY-LEBLOND Jean-Marc, *La science en mal de culture*, Futuribles, Paris, 2004

« L'orbitale atomique ou l'image de l'atome », *Astronoo*, 2013, repéré à *http://www.astronoo.com/fr/rubriques/matiere.html* [consulté le 11 janvier 2023]

Minilab Studios Ltd (2018), *Système Solaire Astrocat (2.3)*, Play Store/App Store

M. MADRID CASADO Carlos, *Hilbert et les bases des mathématiques, au début était l'axiome*, RBA France, Paris, 2015, collection : Grandes idées de la science

NOLAN Christophe, *Interstellar*, Warner Bros., 2014

Musée National de l'Éducation, « La bande dessinée comme moyen d'apprentissage », *Réseau Canopé*, 2018, repéré à *https://www.reseau-canope.fr/musee/fileadmin/user_upload/Selection_thematique_BD.pdf* [consulté le 6 janvier 2023]

O'LUANAIGH Cian, « Voir l'invisible : événements en physique des particules », *CERN*, juin 2015, repéré à *https://home.cern/fr/news/news/detectors/seeing-invisible-event-displays-particle-physics* [consulté le 15 janvier 2023]

PENROSE Roger, *À la découverte des lois de l'univers : La prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Odile Jacob, Paris, 2007

« Physique-Chimie Terminale », *Le livre scolaire*, collection 2020, repéré à *https://www.lelivrescolaire.fr/books/* [consulté le 6 janvier 2023]

Pour la science Hors-série n°114, *Physique des particules, dépasser le modèle standard ?*, janvier 2022

RAICHVARG Daniels et JACQUES Jean, *Savants et ignorants une histoire de la vulgarisation des sciences*, Seuil, 1991

ROBERT Didier, « Mathématiques et Physique. Le langage de la Nature est-il mathématique ? », *Laboratoire de mathématiques Jean Leray, Université de Nantes*, 2015, repéré à *https://www.math.sciences.univ-nantes.fr/~robert/conf_upn_07.pdf* [consulté le 8 décembre 2022]

SACCO Laurent, « Le graphène viole la loi de conduction de la chaleur de Fourier », *Futura Sciences*, mai 2014, repéré à *https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-graphene-viole-loi-conduction-chaleur-fourier-53740/* [consulté le 9 novembre 2023]

SCARANI Valerio, *Initiation à la physique quantique, la matière et ses phénomènes*, édition Vuibert, Paris, 2016

SCHULTZ Isaac, « Les couleurs des images du télescope Webb sont-elles ‹ fausses › ? », *Gizmodo*, août 2022, repéré à *https://gizmodo.com/webb-space-telescope-image-colorization-1849320633* [consulté le 3 janvier 2023]

ScienceClic, *Électrodynamique quantique et Diagrammes de Feynman*, février 2021, repéré à *www.youtube.com/watch?v=5QQHwyzwxyE&t=795s* [consulté le 18 décembre 2022]

ScienceClic, *La théorie des Cordes*, juillet 2021, repéré à *www.youtube.com/watch?v=f0e-Soo1qFQ* [consulté le 19 décembre 2022]

VILLATORRO R. Francisco, « Experimento de tipo Bell con imágenes ‹ fantasma › », *Naukas*, juillet 2019, repéré à *https://francis.naukas.com/2019/07/14/experimento-de-ti-po-bell-con-imagenes-fantasmas/* [consulté le 21 janvier 2023]

YORIFUJI Bunpei, *La vie merveilleuse des éléments*, Éditions B42, Paris, 2017

Je suis reconnaissante envers le docteur Bruno Mendiboure qui m'a beaucoup aidé lors d'un échange pédagogique sur la physique à l'Université. De même, je remercie la doctoresse Alexandra Ain pour son suivi et ses conseils sur cet écrit.

Je dédie cette note aux professeurs de Science et Vie de la Terre, Jean-Claude Vasseur, et de Physique-Chimie, Alexandre Gonzalez, d'avoir cultivé cette passion que j'entretiens pour la science depuis le Dn Made (diplôme national des métiers d'art et du design). Sans omettre, le docteur et professeur, Yann Aucompte, pour m'avoir fait découvrir le monde théorique de la recherche en design.