L'intelligence est dans les boucles !

François Dubois

01 octobre 2007

Avant-propos
L'Association Française de Science des Systèmes (AFSCET) a tenu ses Journées annuelles 2007 au Moulin d'Andé les 02 et 03 juin. Les travaux portaient sur l'intelligence des systèmes et l'action collective. L'après-midi du 3 juin a été consacrée à une table ronde que nous avons proposée et animée, intitulée "L'intelligence est dans les boucles". Cette table ronde a vu se succéder les exposés liminaires d'E. Nunez, G. Donnadieu, P. Bricage, B. Balcet ainsi que le nôtre, dont le texte est présenté ici. L'objectif était à la fois de rappeler des définitions de base, de pointer un exemple non banal de boucle en physique quantique, de rappeler que la définition mathématique d'une boucle est *en soi* une question délicate et d'ouvrir le débat sur l'importance des boucles pour lier les structures.

1) Quelques définitions

Devant un sujet de débat aussi vaste que celui proposé ici, il convient de prendre le temps de définir les mots qui sont utilisés, à savoir "intelligence" et "boucles".

Selon le *Robert méthodique*[1], l'intelligence est la "faculté de connaître, de comprendre", une "qualité de l'esprit qui comprend et s'adapte facilement", un "ensemble des fonctions mentales ayant pour objet la connaissance rationnelle". Si nous consultons le *Petit Larousse*[2], ces définitions sont enrichies par l'idée que l'intelligence est "l'aptitude à s'adapter à une situation, à choisir en fonction des circonstances". La consultation de *Wikipédia*[3] précise les origines

[1] Nous disposons de l'édition de 1983.
[2] Edition de 2005.
[3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Intelligence

latines puisque "intelligence vient du latin *intellegere*, dont le préfixe *inter* (entre) et le radical *legere* (choisir, cueillir) ou *ligare* (lier) suggèrent essentiellement l'aptitude à relier des éléments qui, sans elle, resteraient séparés". Enfin, J. Piaget[4] a introduit l'idée moderne d'une intelligence qui dérive de l'adaptation du sujet à son milieu.

Par ailleurs, la notion abstraitre de boucle se retrouve dans nos deux dictionnaires : une boucle est "ce qui s'enroule en forme d'anneau et se ferme sur soi-même". Le *Petit Larousse* précise qu'une boucle est "une suite d'effets telle que le dernier réagit sur le premier", alors que le *Robert méthodique* énonce qu'une boucle est un "itinéraire qui ramène au point de départ", comme dans l'expression "boucler la boucle".

2) Une boucle en physique quantique

Il n'est pas possible d'introduire en quelques phrases la physique quantique, qui est une approche à la fois semi-empirique et mathématique pour comprendre la Nature à l'échelle microscopique des molécules, des atomes, de leurs nucléons (protons et neutrons) et des électrons[5], très légers, qui "orbitent" autour du noyau et lient les molécules. Cette description est inséparable de la description des interactions entre les éléments de matière, due essentiellement pour l'échelle macroscopique aux ondes électromagnétiques quantifées, c'est à dire composées de grains de lumière, les photons. Nous renvoyons au traité classique de C. Cohen-Tannoudji, B. Diu et F. Laloë[6] ou au livre de M. Bitbol[7] pour une présentation générale de la mécanique quantique.

Nous retenons ici de tout ce *corpus* de connaissances le "principe d'exclusion de Pauli"[8] qui suppose que deux éléments identiques de matière ne peuvent pas occuper le même point de l'espace tout en étant dans le même état quantique. En fait, ce principe se développe sous des formes très variées

[4] *La Naissance de l'intelligence chez l'Enfant*, Delachaux et Niestlé, 1936.

[5] L'électron a été découvert par J.J. Thomson en 1897 dans les rayons cathodiques. C'est le porteur de la charge élémentaire négative, mise en évidence par l'expérience de la goutte d'huile de R. Millikan en 1909.

[6] *Mécanique quantique*, Hermann, Paris, 1977.

[7] *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Champs, Flammarion, Paris, 1996.

[8] W. Pauli, *Die Allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik*, in Handbuch der Physik, vol. 2, part 23, p. 83-272, Berlin, 1933, *General Principles of Quantum Mechanics*, Springer, 1980.

et donne lieu au “théorème spin-statistique” qui structure clairement la Nature en “matière” et “relations”. Plus précisément, la matière est composée de “fermions” (particules de “spin”[9] demi-entier) alors que les relations entre la matière sont composées de “bosons” (particules de spin entier). D'un point de vue statistique, les fermions (proton, électron, *etc*) suivent la loi de Fermi-Dirac alors que les bosons (le photon par exemple) suivent celle de Bose-Einstein. Ce principe d'exclusion de Pauli est pour nous[10] un guide essentiel pour tenter de mieux comprendre ce qu'est l'espace à cette échelle microscopique. Nous résumons ce paragraphe par cette phrase : **la matière crée l'espace, les relations le structurent !**[11]

La structure du noyau a été bien comprise dans les années 1935 suite aux travaux de H. Yukawa. De très petite taille (son diamètre typique est de l'ordre du Fermi[12]), le noyau est composé de protons[13] et de neutrons. Notons que le proton et l'électron sont stables, alors que le neutron ne l'est pas[14]. Ces nucléons sont liés entre eux par une “interaction forte” qui leur permet de rester proches malgré l'interaction électrostatique qui repousse les charges de même signe (donc les protons, de charge positive) les uns des autres.

R. Feynman a eu l'idée dans les années 1960 que le nucléon n'est pas ponctuel et est composé de “partons” qui n'ont pas de structure géométrique perceptible. M. Gell Mann et G. Zweig ont ensuite proposé le modèle des “quarks” pour décrire le nucléon comme composé de trois quarks liés entre eux par des “gluons” de couleur. Malgré les difficultés conceptuelles comme le “confinement” des quarks (c'est à dire l'impossibilité de les isoler) et leur charge électrique fractionnaire, ce modèle a été confirmé par les expériences menées à l'accélérateur linéaire de Stanford en 1969, pilotées par J. Friedman, H. Kendall et R. Taylor. Le développement théorique de la “chromodynamique quantique” par H. Politzer, F. Wilczek et D. Gross (1973) a permis

[9] Le spin, notion purement quantique, décrit le “tournoiement sur elle-même”, c'est à dire le moment cinétique intrinsèque, d'une particule *a priori* ponctuelle. Il est paramétré par les représentations linéaires du groupe des rotations de l'espace euclidien de dimension trois sur lui-même et ne peut prendre que des valeurs entières (0, 1, 2, *etc*) ou “demi-entières” ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, *etc*).

[10] Voir “Pistes fractaquantiques”, *Res Systemica*, volume 4, numéro 2, 2004.

[11] “On Fractaquantum Hypothesis”, *Res Systemica*, volume 5, 2005.

[12] 1 Fermi $= 10^{-13}$ cm $= 10^{-15}$ m.

[13] Le proton est aussi le noyau de l'atome d'hydrogène.

[14] La désintégration du neutron conduit à la radioactivité β.

ensuite l'essentiel des prédictions en physique des hautes énergies. Ce *corpus* de connaissances a conduit au "modèle standard" décrit par exemple dans le livre de G. Cohen-Tannoudji et M. Spiro[15].

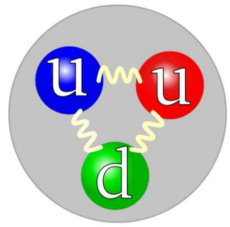

Figure 1. Structure du proton, composé de trois quarks en interaction.

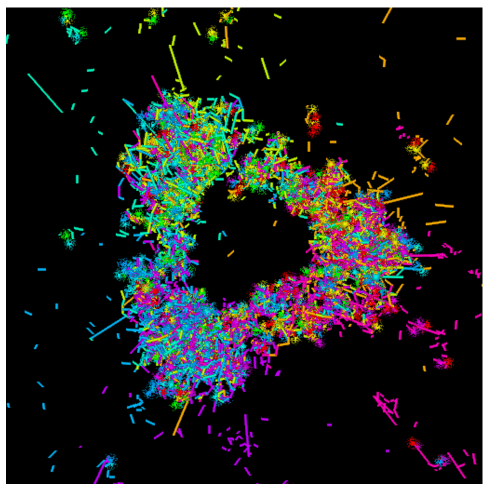

Figure 2. Structure du proton, illustrée par J.F. Colonna.

La représentation typique d'un nucléon (comme le proton à la figure 1[16]), ne donne qu'une vague idée de l'interaction permanente des quarks par échange de gluons à l'intérieur du proton. A en croire au contraire une représentation proposée par J.F. Colonna en 1992 (Figure 2[17]), le proton est en fait d'abord caractérisé par ce "bavardage permanent des gluons" entre les quarks. Surtout, on observe sur la figure 2 la création d'une **boucle**, d'un "chemin fermé" au sein-même du proton ou du neutron, c'est à dire de chaque élément de matière.

[15] *La Matière-espace-temps ; la logique des particules élémentaires*, Fayard, Paris, 1984.

[16] Cette image, extraite de "commons.wikimedia.org", est l'œuvre de Arpad Horvath.

[17] Voir d'autres images analogues sur le site de Jean-François Colonna, http://www.lactamme.polytechnique.fr.

Cette structure topologique, cette boucle quasi-continue, qui traduit l'équilibre dynamique de ce constituant fondamental de la matière, nous paraît comme fondamentalement utile pour se représenter l'espace et la matière à l'échelle du proton. Notons qu'aucun commentaire de ce type ne nous est connu. Nous retenons que la matière, au sein de ses constituants stables les plus massifs (les nucléons) se présente sous la forme de boucles et que ces boucles sont le résultat de la relation continuelle (l'échange permanent de gluons) entre les composants de la matière (les quarks).

Cette représentation permet d'enrichir la vision plus traditionnelle d'une matière "composée de points". Notons que la boucle illustrée Figure 2 n'a *a priori* rien de commun avec la "théorie des cordes" développée par les physiciens depuis ces vingt dernières années pour décrire un niveau encore plus microscopique et présentée en Français dans l'ouvrage de B. Greene[18].

3) Définir mathématiquement une boucle

Nous changeons maintenant fondamentalement de paradigme pour celui des mathématiques afin de tenter de définir une boucle au sein d'une structure X donnée *a priori*. Si on munit un tel ensemble d'une notion de distance, de voisinage, d'une "topologie" et qu'on le suppose d'un seul tenant pour fixer les idées, peut-on dire de manière abstraite si oui ou non l'espace X contient des boucles ? Cette notion est d'abord intuitive. L'espace "surface de la terre" dont la figure 3 décrit un "morceau de carte locale" ne contient pas de boucle *a priori* alors que le tore de la figure 4 (un pneu plein pour fixer les idées) contient clairement une boucle !

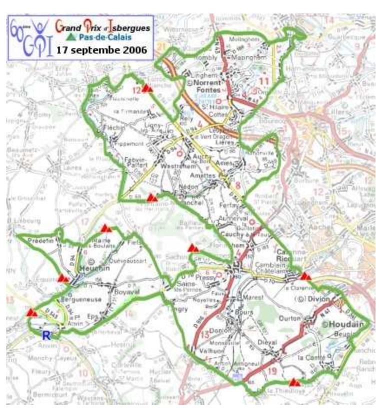

Figure 3. Un itinéraire en boucle pour une promenade.

[18] *L'univers élégant*, traduction C. Laroche, Robert Laffont, Paris, 2000.

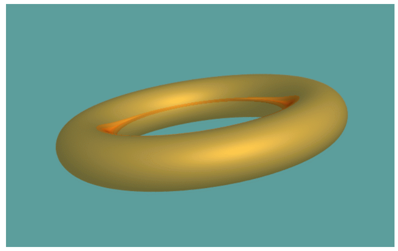

Figure 4. Tore T^1 dans l'espace ordinaire.

D'un point de vue mathématique, la définition d'un espace "qui ne contient pas de boucle"[19] est relativement longue. Nous en donnons quelques étapes dans les paragraphes suivants et renvoyons à l'ouvrage de C. Godbillon[20] pour les définitions complètes.

On doit d'abord introduire la notion de "chemin" γ entre deux points x et y de l'espace X. C'est simplement une application continue de l'intervalle réel classique $[0,\, 1]$ à valeurs dans X[21] telle que $\gamma(0) = x$ et $\gamma(1) = y$. Si on dispose de deux chemins γ_0 et γ_1 entre deux points x et y fixés dans X, une question naturelle est de savoir si ces deux chemins "sont homotopes", c'est à dire si l'on peut déformer continuement le chemin γ_0 pour obtenir le chemin γ_1. Existe-t-il une famille (continue !) de chemins γ_θ (θ appartient à l'intervalle $[0,\, 1]$) permettant de déformer γ_0 en γ_1, ainsi qu'illustré à la figure 5 ? Si la réponse est positive, on dit que les chemins γ_0 et γ_1 sont homotopes et dans le cas contraire, ils ne sont pas homotopes et sont vraiment différents d'un point de vue topologique.

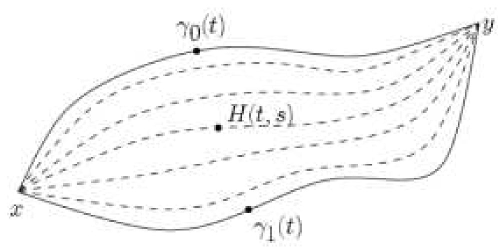

Figure 5. Relation d'homotopie entre chemins allant de x à y.[22]

[19] Un espace topologique qui ne contient pas de boucle est dit "simplement connexe"

[20] *Eléments de topologie algébrique*, Hermann, Paris, 1971.

[21] On note une telle application $[0,\, 1] \ni t \longmapsto \gamma(t) \in X$.

[22] Cette image est l'œuvre de Florian Strunk, voir http://www.math.uni-bielefeld.de/florian.

Considérons maintenant un "lacet", c'est à dire un chemin γ qui revient à son point de départ : $x = \gamma(0) = \gamma(1) = y$. Il existe pour tout point $x \in X$ le "chemin trivial" $[0, 1] \ni t \longmapsto \gamma(t) \equiv x \in X$ "qui ne bouge pas". Une question naturelle est de savoir si tout lacet γ_1 contenant x est homotope ou pas au lacet γ_0 trivial introduit ci-dessus, si on peut transformer continuement le lacet arbitraire γ_1 (le chemin extérieur de la figure 3 par exemple) en un lacet constant sur l'un des points de la carte. Dans le cas particulier de la figure 4, la réponse est positive. On dit que le lacet correspondant est "homotope à un point". On peut montrer que c'est le cas pour tout lacet tracé sur la sphère S^2. On peut toujours le ramener à un point arbitraire par homotopie. On dit que la sphère S^2 est un espace simplement connexe. Dans un espace topologique simplement connexe, il n'y a pas de lacet qui ne puisse être démêlé !

Si on considère maintenant un tore plein comme celui de la figure 4, le lacet "qui fait tout le tour" (comme celui partiellement visible sur cette figure) ne peut pas être ramené continuement à un unique point tout en restant dans l'espace défini par le tore T^1. On dit que le tore est une structure topologique qui n'est pas simplement connexe. En d'autre termes, il existe de vraies boucles qui ne peuvent pas être démêlées. D'un point de vue mathématique, on peut munir le quotient de l'ensemble des lacets divisé par les lacets homotopes à un point d'une structure de groupe, le "groupe fondamental"[23] $\pi_1(X)$ de la structure X. Pour la sphère S^2, on a $\pi_1(S^2) = \{0\}$ qui indique qu'il n'y a pas de boucle dans cet espace alors que pour le tore T^1, on a $\pi_1(T^1) = \mathbb{Z}$, ensemble des nombres entiers positifs, négatifs ou nuls. Ce dernier résultat indique qu'on peut enrouler un lacet dans un tore pour un nombre arbitrairement grand de tours, dans un sens ou dans un autre...

4) Des boucles pour lier les structures

Nous disposons de la notion de boucle, à la fois simple et élaborée, et nous nous demandons si un constituant fondamental de la matière (le proton) peut se réduire à ce modèle mathématique. Cette question, bien que posée sous forme trop imprécise, est illustrée Figure 6. Nous retenons que la structure matière-relation peut créer de la topologie non triviale !

Nous observons aussi que si la matière fondamentale du nucléon peut être repésentée par une boucle, alors il existe une seconde boucle formée, elle, par

[23] Le groupe fondamental est aussi appelé "groupe de Poincaré", en hommage à Henri Poincaré, mathématicien du début du vingtième siècle.

l’espace extérieur, “autour” de la matière. Cette notion est illustrée (et non définie !) à la figure 7. Nous en déduisons que l’espace est en fait composé d’une quasi-infinité de boucles qui s’enroulent autour de la matière.

Si, pour conclure rapidement, nous nous plaçons dans le cadre de “l’hypothèse fractaquantique”[24], ce qui vient d’être décrit à la micro-échelle dans ce travail peut se transposer à toutes les structures de la Nature, quelle qu’en soit leur taille ; la structure à petite échelle sépanouit dans tout l’univers. Ainsi, les boucles créent des liens topologiques entre des structures et permettent l’adaptation du sujet à son milieu. Nous notons que nous venons de retrouver la définition de l’intelligence selon J. Piaget, proposée au premier paragraphe. Ainsi, la boucle est bouclée !

Figure 6. Le proton est-il réductible à une boucle ?

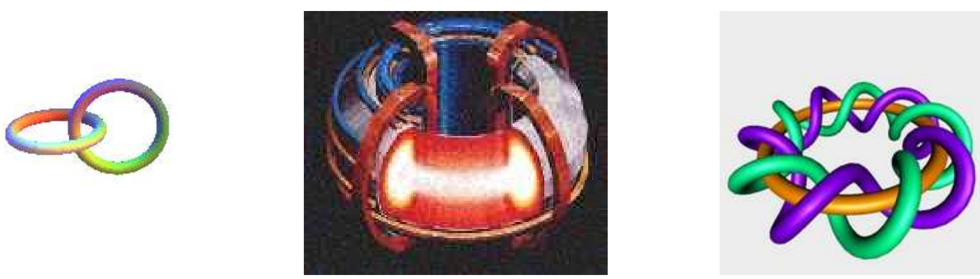

Figure 7 . L’espace se réduit-il à des boucles autour de la matière ?

5) Remerciements

Un salut très amical à Jean-François Colonna, qui nous a transmis la figure 2 sous un format électronique qui permet de mettre en valeur la chromodynamique et le contraste avec le vide ambiant !

[24] *Res Systemica*, volume 2, 2002.