

Séance solennelle du 2 février 2026

De la matière palpable à la matière... impalpable

Jean-Pierre NOUGIER

Professeur honoraire à l'Université de Montpellier
Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS-CLÉS

Antimatière, énergie, énergie noire, esprit, matière, matière noire, ondes, réactions nucléaires, vide.

RÉSUMÉ

On montre que la matière peut se transformer en énergie et réciproquement, *via* notamment les réactions nucléaires. L'énergie apparaît ainsi comme une forme de matière. Outre la matière connue, notre univers contient aussi de la matière noire et de l'énergie noire, dont on ne sait à peu près rien. Il devrait aussi contenir de l'antimatière, mais on n'en a pas détecté. Quant aux particules, même mésoscopiques, elles sont à la fois onde et matière. Des fluctuations du vide immatériel peuvent surgir matière et antimatière. L'esprit, par essence immatériel, naît de l'organisation de la matière contenue dans le cerveau.

1. Introduction

Lorsque Christian Nique, notre secrétaire perpétuel, m'a proposé il y a deux mois de vous parler de « la matière », j'ai tout de suite été intéressé. Mais par prudence j'ai demandé quelques jours de réflexion avant d'accepter. Entre temps j'ai consulté la définition du mot « matière » dans des dictionnaires (pour savoir de quoi j'allais vous parler...). Et voici ce qu'on y trouve :

MATIÈRE :

- « substance dont sont faits les corps perçus par les sens et dont les caractéristiques fondamentales sont l'étendue et la masse » ;
- « substance constituant les corps, doués de propriétés physiques » ;
- « substance particulière dont est faite une chose connaissable par ses propriétés ».

Une assez bonne définition me semble être la suivante¹ :

La matière est constituée d'atomes de différentes natures qui, assemblés entre eux, composent tous les éléments solides, liquides, gazeux ou plasmatiques qui constituent l'Univers. Ces éléments, visibles ou invisibles à nos yeux par les rayonnements qu'ils émettent, ont une masse qu'il est possible de calculer, et qui exerce une force d'attraction gravitationnelle autour d'elle.

¹ https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/qu-est-ce-que-la-matiere-noire-et-l-energie-noire_121127

Et le dictionnaire Larousse ajoute : « litt. : chose physique, corporelle, par opposition à l'esprit, à l'âme. »

J'en ai donc déduit que la matière est une substance matérielle. Elle possède une forme, on peut la voir, la toucher, la sentir... On peut la palper...

Alors j'ai remonté un petit peu dans le temps, jusqu'à l'année 1905 précisément, qui fut pour les sciences un *annus mirabilis*, une année miraculeuse : elle vit la publication par Albert Einstein, dans la revue allemande *Annalen der Physik*, de quatre articles qui contribuent à établir les fondements de la physique moderne :

- Le premier publié le 17 mars² étudie l'effet photovoltaïque et annonce que la lumière, jusque-là considérée comme une onde, peut se comporter comme une particule : c'est l'un des fondements de la mécanique quantique, il se traduit aujourd'hui par la prolifération des panneaux solaires. Or une particule, c'est de la matière ; donc la lumière, c'est aussi de la matière ? « Bizarre, bizarre », dirait Louis Jouvét...
- Le deuxième article, publié le 11 mai³, explique le « mouvement brownien », qui est un mouvement aléatoire des particules, explication de base de la théorie cinétique des gaz ;
- Dans son troisième article, publié le 30 juin⁴, en résolvant des incohérences sur les notions d'espace et de temps, il introduit ce qui deviendra la théorie de la relativité restreinte. La relativité restreinte et la relativité générale permettent en particulier aujourd'hui le réglage extrêmement précis des horloges atomiques des satellites GPS qui nous permettent de nous positionner ;
- Dans son quatrième article enfin, publié le 27 septembre⁵, Einstein introduit sa célèbre relation :

$$E = mc^2 \quad (1)$$

C'est sans doute l'une des plus célèbres équations de la physique. Cette relation exprime le fait qu'un corps matériel de masse au repos m possède une énergie (énergie de repos) égale à sa masse m multipliée par le carré de la vitesse de la lumière c .

De ces articles m'est venue la conviction que la matière n'est peut-être pas si palpable qu'il y paraît, d'où le titre et le contenu de cette conférence.

2. Énergie et Matière

2.1. Énergie mécanique

L'énergie mécanique se manifeste sous trois formes :

- L'énergie cinétique : un corps de masse m qui se déplace à la vitesse v possède une énergie cinétique $E_c = mv^2/2$. C'est par exemple l'énergie d'un obus de canon, d'une balle de tennis, d'une voiture en mouvement, etc. ;
- L'énergie potentielle : un corps dans un champ de forces possède une énergie potentielle, c'est-à-dire qui peut (d'où le qualificatif de « potentielle ») se transformer

² Albert EINSTEIN, « Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt », *Annalen der Physik* 17-6, 1905, p. 132-148.

³ *Id.*, « Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen », *Annalen der Physik* 17-8, 1905, p. 549-560.

⁴ *Id.*, « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », *Annalen der Physik* 17-10, 30 juin 1905, p. 891-921.

⁵ *Id.*, « Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? », *Annalen der Physik* 18-13, 1905, p. 639-641.

en énergie cinétique. Ainsi chacun de nous, qui sommes dans le champ gravitationnel de la Terre, possédons sans nous en rendre compte une énergie potentielle. Le skieur de masse m que le télésiège remonte d'une hauteur h jusqu'au sommet de la piste augmente son énergie potentielle de la quantité mgh où g est l'accélération de la pesanteur terrestre. Il acquiert cette énergie grâce à l'énergie dépensée par le remonte-pente qui le tire vers le haut. Une fois qu'il est au sommet de la piste, il n'a pas la sensation d'avoir plus d'énergie que lorsqu'il était en bas. Mais c'est grâce à cette énergie qu'il peut s'élancer dans la pente et prendre de la vitesse, c'est-à-dire transformer son énergie potentielle en énergie cinétique ;

- L'énergie au repos : c'est celle décrite par la relation d'Einstein $E = mc^2$, qui exprime une *équivalence* entre la masse et l'énergie. Ainsi on peut caractériser une particule au repos indifféremment par sa masse (exprimée par exemple en kg) ou par son énergie au repos (exprimée par exemple en joules, ou usuellement en électrons-volts), on passe d'une expression à l'autre en divisant ou en multipliant par c^2 . La masse d'un proton par exemple vaut $1,673 \times 10^{-27}$ kg ou encore 938 MeV (millions d'électrons-volts).

L'écriture de l'équation d'Einstein implique qu'on puisse transformer l'énergie en masse et vice-versa.

2.2. Transformation de l'énergie en masse

Un noyau atomique est constitué de nucléons, c'est-à-dire de protons et de neutrons. On pourrait croire que la masse du noyau est la somme des masses des protons et des neutrons qui le constituent :

$$M(\text{noyau}) = M(\text{neutrons}) + M(\text{protons})$$

Cette égalité est fautive ! en réalité, on a :

$$M(\text{noyau}) = M(\text{neutrons}) + M(\text{protons}) - m \quad (2)$$

La masse du noyau est plus petite que la somme des masses des protons et des neutrons : m est le *défaut de masse*. Comment expliquer cette « anomalie » ? Par l'équation d'Einstein (1) ! Considérons en effet le noyau d'un atome, par exemple celui de l'hélium constitué de 2 protons et 2 neutrons (figure 1). Si nous voulons, à partir de ce noyau, récupérer les protons libres et les neutrons libres, il nous faut casser le noyau, par exemple en le bombardant avec des neutrons, donc apporter de l'énergie au noyau d'hélium (figure 1).

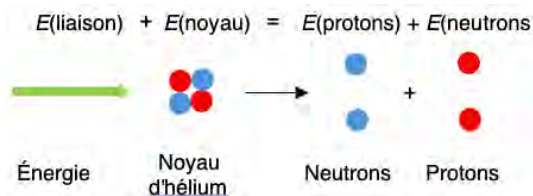


Figure 1 : schéma d'un noyau d'hélium cassé par apport d'énergie pour libérer les neutrons et les protons qui le constituent

Cette énergie nécessaire pour casser le noyau est égale à l'énergie qui maintient ensemble les neutrons et les protons, c'est l'énergie de liaison $E(\text{liaison})$. La conservation de l'énergie implique que :

$$E(\text{liaison}) + E(\text{noyau}) = E(\text{neutrons}) + E(\text{protons}) \quad (3)$$

Ainsi l'énergie de liaison a transformé un noyau de masse $M(\text{noyau})$ en un ensemble de masse plus grand constitué par les neutrons libres et les protons libres : il y a eu transformation de l'énergie en masse, donc en matière. Ainsi l'énergie apparaît comme étant une forme impalpable de la matière palpable. Si l'on divise tous les termes de l'équation (3) par c^2 , on retrouve l'équation (2) : le défaut de masse est la masse de l'énergie de liaison.

On effectue chaque jour des expériences de ce type par exemple dans les anneaux de collision du CERN (Centre européen de recherche nucléaire) à Genève.

Ainsi on peut mesurer l'énergie en unités d'énergie du système international (joules, en abrégé J). Mais on utilise très souvent des électrons-volts (eV) : un eV est l'énergie d'un électron porté au potentiel de 1 volt. L'énergie des explosifs est habituellement donnée en tonnes de TNT⁶, dont l'énergie de détonation est 4,184 MJ/kg, ce qui signifie que l'explosion de 1 kilotonne (= 1 000 tonnes) de TNT dégage une énergie de 4,184 TJ = $4,184 \times 10^{12}$ J soit 4,184 millions de millions de joules⁷. L'énergie de détonation de la dynamite est aussi de l'ordre de 5 MJ/kg. Mais on peut aussi, à l'aide de la formule d'Einstein, mesurer les énergies en unités de masse. Le tableau 1 ci-dessous permet d'effectuer les différentes conversions.

$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
$1 \text{ kt TNT} = 4,184 \text{ TJ} = 4,184 \times 10^{12} \text{ J}$ soit $1 \text{ J} = 0,24 \times 10^{-12} \text{ kt TNT}$
$1 \text{ eV} = \text{énergie au repos d'une masse de } 9,110 \times 10^{-37} \text{ kg}$

Tableau 1 : Tableau de conversion des unités utilisées pour mesurer l'énergie

2.3. Transformation de la masse en énergie

La transformation de masse en énergie correspond à la figure 1 lue de droite à gauche : si la réaction nucléaire de deux ou plusieurs corps de masse totale M_1 conduit à la création d'un ou plusieurs corps de masse totale inférieure M_2 ($M_2 < M_1$), la masse perdue (= le défaut de masse) est dissipée sous forme d'énergie dite « énergie nucléaire ». Ce défaut de masse, pour la plupart des atomes, est de l'ordre de 8 à 9 MeV par nucléon (proton ou neutron), soit environ 1/100 de la masse initiale⁸.

Ceci peut se faire soit par fission nucléaire, soit par fusion nucléaire.

La fission nucléaire

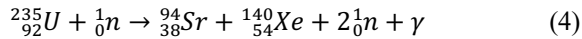
C'est une réaction dans laquelle un noyau lourd se casse en noyaux plus légers. C'est ce qui peut se produire par exemple avec l'uranium, le plutonium, etc. Une des réactions les plus courantes dans la fission de l'uranium 235 (^{235}U), lorsqu'il est percuté par un neutron lent, donne deux noyaux plus légers (le strontium et le xénon), deux neutrons et du rayonnement gamma.

⁶ Le TNT est le trinitrotoluène, il est préparé par nitration du toluène (C_7H_8), sa formule est $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$.

⁷ On peut noter que les explosifs chimiques produisent moins d'énergie que les produits alimentaires. Ainsi la combustion des matières grasses dégage 38 MJ/kg et le sucre 17 MJ/kg. Donc si vous voulez mincir, ne mangez ni sucre, ni graisses : mangez plutôt de la dynamite...

⁸ On constate de même un défaut de masse dans les liaisons chimiques, mais dans ce cas l'énergie de liaison est due au réarrangement des couches électroniques, elle est considérablement plus faible (quelques eV) que celle entre nucléons (de l'ordre de la dizaine de MeV).

La réaction est la suivante⁹ :



Cette réaction produit une énergie de l'ordre de 200 MeV par nucléon. Si les deux neutrons libérés percutent deux autres atomes d'uranium 235, 4 neutrons sont libérés, puis 8 à l'étape suivante, etc. C'est la réaction en chaîne, exponentielle, qui aboutit à une explosion nucléaire, c'est la bombe atomique (dite bombe A). La violence de l'explosion atomique est contenue dans l'équation d'Einstein, elle apparaît à cause de la grande valeur de la vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8$ m/s).

Quelle est l'énergie libérée par un défaut de masse de seulement 1 gramme (soit 10^{-3} kg) ? La formule d'Einstein donne :

$E(1 \text{ g}) = 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J} = 90 \times 10^{12} \text{ J}$, c'est-à-dire d'après le tableau 1 :

$$E(1 \text{ g}) = 90 \times 10^{12} \times 0,24 \times 10^{-12} = 21,6 \text{ kt TNT} \quad (5)$$

Ainsi l'énergie nucléaire contenue dans un gramme de matière est équivalente à 21 600 tonnes de TNT !

Dans la bombe d'Hiroshima, qui pesait 4 tonnes, la masse de la partie active, c'est-à-dire du combustible nucléaire (uranium 235), n'était que 64 kg, dont seulement 700 g environ entrèrent en fission¹⁰. La puissance développée par cette bombe a été estimée à 12 à 15 kt de TNT, ce qui signifie que le défaut de masse de cette fission a été de l'ordre de 0,6 à 0,7 g, soit environ un millième de la masse qui a explosé¹¹. Ainsi l'énergie contenue dans seulement 0,7 g de matière a détruit la ville d'Hiroshima !

Dans les centrales nucléaires, la réaction en chaîne est maîtrisée. Le combustible nucléaire est constitué de barres (nommés aussi crayons) disposées de façon à contrôler le flux de neutrons émis. La chaleur dissipée est utilisée pour actionner des turbines qui produisent l'électricité.

Les moteurs nucléaires assurant la propulsion de sous-marins, porte-avions ou brise-glace sont des mini centrales nucléaires.

La fusion nucléaire

La fusion nucléaire consiste à associer deux noyaux légers pour créer un noyau plus lourd. Pour effectuer une fusion, il faut vaincre la répulsion électrique entre les protons qui se rapprochent. Ceci nécessite des températures très élevées et/ou des pressions considérables.

Les réactions de fusion nucléaire constituent le moteur des étoiles, qui pour l'essentiel « brûlent » de l'hydrogène pour synthétiser de l'hélium, puis, en fin de vie, du carbone et divers éléments allant jusqu'au fer et au-delà dans les supernovae ou les collisions

⁹ Un atome comporte un noyau autour duquel gravite un nuage d'électrons. Le noyau est constitué de protons (chargés positivement) et de neutrons (électriquement neutres). Il y a autant d'électrons (chargés négativement) que de protons. Un élément X est noté ${}^A_Z X$ où X est le symbole de l'élément, Z est le nombre de protons (ou numéro atomique) et A est le nombre de nucléons, c'est-à-dire le nombre de protons plus le nombre de neutrons, appelé encore nombre de masse (il s'ensuit que le nombre de neutrons est $A - Z$). Deux isotopes sont deux éléments qui comportent le même nombre de protons (et donc aussi d'électrons), mais un nombre différent de neutrons. Ainsi le carbone « normal » a un noyau qui comporte 6 protons et 6 neutrons (donc 12 nucléons), il est noté ${}^{12}_6\text{C}$. Le fameux « carbone 14 », utilisé en datation géologique, est un isotope du carbone 12 qui comporte 6 protons et 8 neutrons (donc 14 nucléons), il est noté ${}^{14}_6\text{C}$.

¹⁰ https://fr.wikipedia.org/wiki/Little_Boy.

¹¹ En fait l'énergie libérée par la fission d'un atome d'uranium 235 est de 202,8 MeV soit $3,2489 \times 10^{-11} \text{ J}$, soit 83,24 TJ/kg (https://fr.wikipedia.org/wiki/Uranium_235), ce qui, avec le tableau 1, donne pour 700 mg entré en fission une énergie de 13,9 kt TNT.

d'étoiles à neutrons. On suppose même que des éléments plus lourds que l'uranium, jusqu'à 260 et même au-delà, auraient pu être créés bien qu'on n'en ait jamais observé.

La fusion est utilisée dans les bombes à hydrogène, ou bombe H, dont le dispositif d'amorçage est une bombe A. Une bombe H est typiquement 1 000 fois plus puissante que celle d'Hiroshima. La plus forte explosion observée à ce jour est celle de la *Tsar bomba* soviétique (57 Mt de TNT, soit environ 4 000 fois l'énergie de la bombe d'Hiroshima). La bombe H est polluante, non pas à cause de la fusion de l'hydrogène qui ne crée pas de matière radioactive, mais à cause de la bombe A utilisée comme détonateur.

Des expériences sont actuellement menées pour créer des centrales nucléaires à fusion soit par confinement magnétique (tokamak) comme dans le projet ITER, soit par confinement laser. Mais on n'espère pas actuellement pouvoir contrôler la fusion avant plusieurs décennies.

Il résulte de ce qui précède que la matière apparaît comme étant la forme que prend l'énergie lorsqu'elle se concentre dans une région de dimensions de l'ordre de noyaux atomiques. L'énergie est donc de la matière impalpable.

3. Matière noire et énergie noire

Il existe une « matière noire » que l'on n'a pas pu voir et de « l'énergie noire » qu'on n'a pas pu mesurer, toutes deux étant inconnues et non directement décelables. Comment donc s'est-on rendu compte de leur existence ?

3.1. L'énergie noire

Que se passe-t-il si on tire un obus verticalement en l'air ? Il s'élève dans le ciel, ralentit, puis retombe sur terre à cause de la gravité. Toutefois, si l'obus part avec une vitesse suffisante (dite vitesse de libération) il peut échapper à l'attraction terrestre. Mais dans tous les cas sa vitesse diminue progressivement, même s'il ne retombe pas.

Lorsqu'une fusée d'un feu d'artifice explose, les petits morceaux qu'elle contient partent en gerbe dans toutes les directions, puis retombent au sol à cause de la gravitation terrestre. Mais si la fusée explosait en un lieu où il n'y a pas de gravitation, deux situations pourraient se présenter :

- les différents fragments s'attirant mutuellement, chaque fragment attiré par les autres ralentirait sa course, puis s'arrêterait, rebrousserait chemin, et tous les fragments viendraient se concentrer au point de départ de l'explosion, par « effondrement gravitationnel » ;
- si l'explosion était très violente, les fragments ralentiraient leur course, mais continueraient leur chemin vers l'infini en échappant à l'attraction mutuelle.

Dans tous les cas, pendant leur expansion, les fragments ralentiraient leur course.

Il devrait en être ainsi de la matière projetée à la suite de l'explosion du Big Bang (en réalité, il ne s'agit pas d'objets projetés dans un univers fixe : c'est l'Univers lui-même qui s'étend, tel un ballon de baudruche qu'on gonfle). Les amas galactiques formés à l'aide de cette matière, s'éloignant les uns des autres, devraient ralentir leur course. Or il n'en est rien : en 1998, Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt et Adam G. Riess découvrent que, loin de ralentir, l'expansion de l'Univers s'accélère depuis 7 milliards d'années. On attribue ce phénomène à une matière inconnue et répulsive au lieu d'être attractive, « l'énergie noire » dont on ignore à peu près tout. Ces trois chercheurs obtiennent le prix Nobel en 2011 pour cette découverte. Mais... depuis 2024-2025, des

observations, effectuées sur les vitesses de fuite de près de 15 milliards de galaxies par le DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument, grande expérience internationale, regroupant plus de 900 chercheurs, répartis dans plus de 70 institutions du monde entier), ont montré que l'accélération de l'expansion ne serait pas constante¹² : elle était plus importante il y a 7 milliards d'années, mais depuis 2,5 milliards d'années elle tend à diminuer, ce qui, si cela était confirmé, remettrait en cause le modèle standard de l'Univers !

3.2. La matière noire

Une galaxie spirale comporte généralement un noyau d'étoiles, avec des branches en forme de spirale (d'où le nom de « galaxie spirale »). L'essentiel de la masse est concentré dans le noyau. Dans ces conditions, les lois de Newton prédisent que (comme dans un système solaire par exemple) la vitesse des étoiles des branches, situées en dehors du noyau, décroisse comme la racine carrée de leur distance au centre (figure 2, courbe A). Or on observe que toutes les étoiles en dehors du noyau ont pratiquement la même vitesse¹³. Ceci implique soit que la galaxie soit remplie d'une matière actuellement indétectable, appelée « matière noire », soit que les lois de la physique ne s'appliquent plus à cette échelle. En fait c'est l'hypothèse de la matière noire qui est pour l'instant retenue, car elle explique aussi d'autres comportements observés notamment dans les galaxies elliptiques qui, en l'absence de matière noire, devraient subir un effondrement gravitationnel en leur centre. Une des hypothèses actuelles est que la matière noire pourrait être constituée de trous noirs primordiaux, créés pendant la période inflationniste de l'univers, c'est-à-dire aux premières secondes de sa création¹⁴. En effet, ces trous noirs sont fortement gravitationnels et très difficilement détectables.

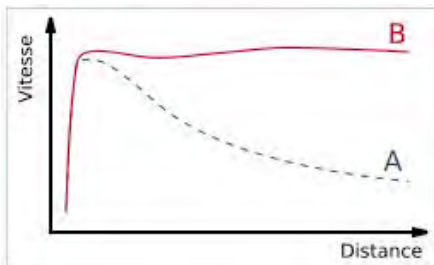


Figure 2 : vitesses des étoiles en fonction de leur distance au centre d'une galaxie spirale : vitesses prédites (A), vitesses observées (B)¹⁰

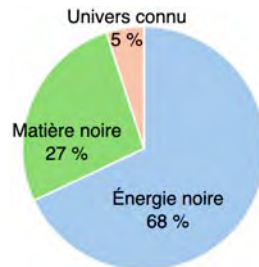


Figure 3 : Composition de l'Univers connu

¹² https://www.unige.ch/theologie/a_ciel_ouvert/actualites/editorial-de-lete-2025-lenergie-sombre-et-l'expansion-de-lunivers-par-trinh-xuan-thuan

¹³ Kor G. BEGEMAN, Adrick H. BROEILS, Robert H. SANDERS, « Extended rotation curves of spiral galaxies : dark haloes and modified dynamics », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 249-3, 1991, p. 523-537.

¹⁴ La masse des trous noirs primordiaux est directement proportionnelle à leur date de création. Un trou noir primordial créé au temps de Planck (10^{-43} s après le Big-Bang) aurait la masse minimale de 10^{-5} g, alors que la masse d'un trou noir formé une seconde après serait de 100 000 masses solaires. Ces trous noirs sont de taille microscopique, inférieure à celle d'un atome. Source :

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/trous-noirs/9-detection-des-trous-noirs-primordiaux/#:~:text=Un%20trou%20noir%20primordial%20créé,ferait%20100%20000%20MS>

On estime actuellement que seulement 5 % de notre univers est connu et que s'y appliquent les lois de la physique, 27 % est constitué de matière noire, le reste est de l'énergie noire (figure 3) !

Notre Univers comporte donc 68 % d'énergie noire (matière impalpable) et 27 % de matière noire (matière palpable « non encore palpée »...).

4. Matière et antimatière

À chaque particule de matière correspond une particule d'antimatière, de même masse et même spin, mais de charge électrique opposée. Ainsi au proton chargé positivement correspond un antiproton chargé négativement, à l'électron chargé négativement correspond l'antiélectron (ou positon ou positron) chargé positivement. Les particules neutres (photons, neutrons) sont leurs propres antiparticules.

D'après le modèle standard de la cosmologie¹⁵, l'Univers issu du Big Bang aurait dû comporter autant de matière que d'antimatière. Or l'on n'a pas détecté d'antimatière dans l'Univers observable, excepté dans les rayons cosmiques, qui viennent du Soleil ou d'autres étoiles et sont constitués essentiellement de protons, hélium, antiprotons, positrons et autres particules neutres. L'absence apparente d'antimatière dans notre Univers est l'un des problèmes du modèle standard. Toutefois :

- il ne faut pas exclure la possibilité d'une infime dissymétrie entre la création de matière et d'antimatière d'où résulterait notre Univers ;
- l'antimatière pourrait aussi être concentrée dans une partie non visible de l'Univers, voire dans un autre Univers (un anti-Univers) ;
- nous observons les galaxies essentiellement grâce aux photons qu'elles émettent. Or le photon est aussi son antimatière, il n'est donc pas impossible que nous observions aussi des photons d'antimatière en croyant qu'il s'agisse de photons de matière.

De l'antimatière est créée de façon artificielle dans les anneaux de collision des grands accélérateurs tels le LHC (Large Hadron Collider) du CERN à Genève : en projetant l'une contre l'autre des particules de matière, on peut créer des antiprotons et des positrons. En général les particules d'antimatière se recombinent très rapidement avec des particules de matière. En effet, lorsque la matière et l'antimatière entrent en contact, elles peuvent s'annihiler en transformant leur masse en énergie suivant la relation d'Einstein $E = mc^2$ déjà mentionnée. Nous avons vu que ce type de réaction dégageait une énergie considérable. Elle ne peut toutefois pas être utilisée, car il faut dépenser beaucoup plus d'énergie pour créer de l'antimatière que celle que l'on pourrait ainsi récupérer.

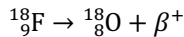
On envisage la construction d'usines pour créer de l'antimatière, la séparer des autres particules et la stocker dans des champs magnétiques, puis de les ralentir pour constituer des atomes d'antimatière. Ainsi en fusionnant 10 milligrammes d'antimatière et de matière, on pourrait produire suffisamment d'énergie pour effectuer un voyage Terre-Mars ! Mais nous n'en sommes pas encore là : on peut actuellement stocker quelques millions de particules, alors que 10 mg d'anti-hydrogène comportent

¹⁵ Le modèle standard de la cosmologie est celui qui, dans l'état actuel, décrit le mieux l'évolution de l'Univers observable et se trouve le mieux en adéquation avec les observations astronomiques. D'après ce modèle, l'espace est homogène, isotrope et en expansion, et contient de grandes structures galactiques créées par effondrement gravitationnel d'inhomogénéités primordiales formées pendant la phase d'inflation qui a duré entre 10^{-36} et 10^{-33} secondes après le Big-Bang.

$6,02 \times 10^{21}$ atomes d'anti-hydrogène, soit 6 000 milliards de milliards d'antiprotons associés chacun à un positron...

L'antimatière pourrait aussi remplacer la bombe A comme détonateur d'une bombe H. Ainsi autrefois on détruisait une ville en polluant tout. Il sera peut-être un jour possible de détruire notre planète entière sans rien polluer ! On n'arrête pas le progrès... Fort heureusement, compte tenu de l'état des technologies, une telle perspective n'est pas envisageable même dans un avenir lointain.

L'antimatière est utilisée dans la tomographie par émission de positons (TEP ou PET Scan), pour mesurer le métabolisme, c'est-à-dire l'activité d'un organe ou d'une tumeur par injection intraveineuse d'un traceur faiblement radioactif (scintigraphie). En cancérologie, le traceur utilisé est un dérivé du glucose contenant un isotope du fluor, le fluor 18 (^{18}F) : le 18 fluoro-désoxyglucose (noté ^{18}F -FDG). Le seul isotope stable du fluor est ^{19}F , qu'on peut aussi noter ^{19}F , dont le noyau comporte 9 protons et 10 nucléons (donc 10 neutrons). Le fluor 18 (noté aussi ^{18}F), dont le noyau comporte 9 protons et 9 nucléons (donc 9 neutrons), est un élément instable, qui se désintègre spontanément en émettant un positon et un atome d'oxygène 18, suivant la réaction :



où β^+ désigne un positon. Ainsi, à partir du fluor 18 comportant 9 protons et 9 neutrons, un des protons perd sa charge positive sous la forme du positon β^+ et devient donc un neutron ; il reste donc un noyau comportant 8 protons et 10 neutrons, c'est l'oxygène $^{18}_8\text{O}$. La période du ^{18}F est d'environ 50 minutes, ce qui signifie qu'au bout de 50 minutes il ne reste plus que 50 % de la masse initiale de ^{18}F .

Les cellules cancéreuses étant très consommatrices de glucose, le traceur s'accumule sur elles. La désintégration radioactive du ^{18}F donne de l'oxygène $^{18}_8\text{O}$ et un positon qui se recombine immédiatement avec un électron ambiant pour donner deux photons qui se dirigent dans des sens opposés. Des capteurs disposés autour du patient détectent ces photons, ce qui permet de localiser la tumeur (pour la positionner plus précisément, on peut aussi tenir compte de l'absorption plus ou moins grande des photons reçus par les capteurs suivant l'épaisseur de tissus qu'ils traversent en fonction de la localisation plus ou moins profonde de la tumeur).

Ainsi on ne voit pas l'antimatière mais on l'utilise pour soigner des cancers.

Pourquoi ne pas imaginer que quelque part existe un anti-univers contenant des anti-galaxies avec peut-être, dans l'une d'elles, une anti-planète où prospère une anti-civilisation d'anti-humains qui habitent dans des anti-gratte-ciel creusés dans l'anti-terre au lieu de s'élever dans les airs, et dont l'anti-sport favori serait un anti-football où l'on anti-gagnerait en faisant anti-sortir un anti-ballon d'un anti-but au lieu de l'y faire entrer ?

Notons au passage que l'antimatière n'est pas antipalpable ! Elle est palpable ; mais mieux vaut ne pas la palper, au risque de fusionner avec elle et se transformer en énergie...

5. Onde et Matière

La nature de la lumière a longtemps fait débat. Ainsi par exemple, alors qu'Isaac Newton (1643-1727) affirmait que « la lumière est une mitraille de corpuscules qui se propagent dans l'espace », Christian Huygens (1629-1695) défendait un modèle ondulatoire.

À la fin du XIX^e siècle, après les multiples expériences d'interférences et de diffraction (Young, Fresnel, Fraunhofer, etc.) et les travaux de Joseph Fourier, les physiciens étaient convaincus que la lumière était de nature ondulatoire.

Analysons une expérience d'interférence par les franges d'Young (figure 4) : une source lumineuse S envoie un faisceau lumineux (par exemple de lumière rouge) sur un écran percé de deux fentes parallèles A et B (les fentes d'Young). Le faisceau incident se divise en deux faisceaux, traversant respectivement les fentes A et B, qui vont frapper un écran. Dans la partie commune aux deux faisceaux apparaît sur l'écran une alternance de franges sombres et lumineuses (franges d'interférences) dont l'aspect est représenté à droite de l'écran sur la figure 4. En un point C de l'écran parviennent les deux rayons lumineux SAC et SBC.

- Si les distances SAC et SBC sont égales ou diffèrent d'un nombre entier de longueurs d'ondes (figure 5a), les deux ondes lumineuses se superposent exactement, l'interférence est dite « constructive », le point C est lumineux¹⁶.
- Si les distances SAC et SBC diffèrent d'une demi-longueur d'onde ou d'un nombre impair de demi-longueurs d'ondes (figure 5b), la somme des amplitudes des deux ondes est nulle à tout instant (les arches positives d'une onde sont compensées par les arches négatives de l'autre), le point C ne reçoit alors aucune lumière.

Ainsi la nature ondulatoire de la lumière explique parfaitement l'obtention d'interférences lumineuses.

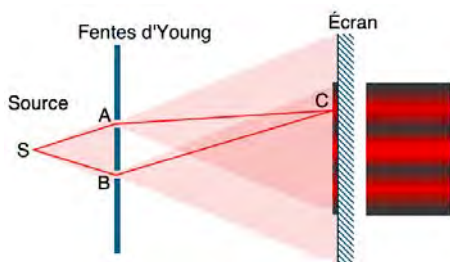
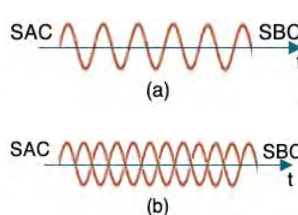


Figure 4 : Schéma du dispositif interférentiel des fentes de Young



Figures 5 : Ondes constructives (a) et destructives (b)

Mais en 1905, Einstein, étudiant l'effet photoélectrique, montre qu'une onde lumineuse de longueur d'onde λ peut se comporter comme une particule, appelée « photon », à laquelle on peut associer une quantité de mouvement $p = h/\lambda$, où h est la constante de Planck. Un photon, c'est une particule, mais est-ce de la matière ? Un photon en effet n'a ni étendue, ni masse, mais il possède une quantité de mouvement et une énergie ! En 1924, dans sa thèse, Louis de Broglie émet l'hypothèse que toute particule possède une nature ondulatoire. À la quantité de mouvement $p = mv$ de la particule, on peut associer la longueur d'onde (dite « longueur d'onde de L. de Broglie ») $\lambda = h/p$. La dualité onde-corpuscule est l'un des fondements de la mécanique quantique, à l'origine d'une multitude d'applications pratiques.

Ainsi, avec la lumière-onde, on réalise des interférences et de la diffraction, ainsi que des microscopes optiques. Avec la lumière-photon on réalise aujourd'hui des panneaux photovoltaïques qui par effet photoélectrique transforment la lumière en

¹⁶ La figure 5a montre la variation en fonction du temps de l'amplitude de l'onde lumineuse arrivant au point C. En réalité, notre œil ne voit pas l'amplitude, alternativement positive puis négative, de l'onde : il perçoit l'énergie qu'elle transporte, proportionnelle au carré de l'amplitude. Et de plus, une onde lumineuse oscille tellement vite que notre œil ne perçoit que la valeur moyenne de cette énergie. Ainsi une lumière rouge de longueur d'onde $0,8 \mu\text{m}$ oscille 375 millions de millions de fois par seconde.

électricité. C'est cette même lumière-onde qui traverse les lentilles de nos appareils photo pour percuter en tant que lumière-photon les CCD (dispositifs à transfert de charge, en anglais Charge Coupled Devices) qui tapissent le fond de l'appareil, créant ainsi, par effet photoélectrique, les courants électriques transformés en bits pour constituer des images numériques.

De même, les électrons, qui conduisent l'électricité, sont utilisés en tant qu'ondes pour construire des microscopes électroniques, environ 1 000 fois plus puissants que les microscopes optiques. Comme ces derniers, le grossissement est limité par les phénomènes de diffraction d'électrons, à caractère spécifiquement ondulatoire.

Mais comment expliquer des interférences si la lumière est constituée de particules ? Un photon, jaillissant de S (figure 4) et traversant la fente A, poursuit sa course tout droit, il n'a aucune raison de percuter l'écran en C. De même s'il passe par la fente B. Et même, en admettant qu'il soit dévié par une fente, pourquoi frapper l'écran préférentiellement aux endroits des franges lumineuses et pas n'importe où ?

Pour Niels Bohr et l'École de Copenhague, la lumière est onde lorsqu'elle passe les fentes A et B, elle est particule lorsqu'elle frappe l'écran. Mais ici il n'y a pas transformation de la particule en onde et vice-versa comme dans l'échange énergie-masse. Ce qui signifie que la lumière n'est ni onde ni particule : c'est « quelque chose » que dans certaines circonstances (interaction de la lumière avec elle-même) il est commode de représenter mathématiquement par une onde, dans d'autres circonstances (interaction lumière-matière) par une particule.

Or la même expérience a été réalisée à l'aide d'un canon à électrons¹⁷ : des électrons sont projetés sur un écran percé de deux fentes parallèles de $0,2 \mu\text{m}$ de large (figure 6), distantes de $0,8 \mu\text{m}$, on observe leur impact sur un écran placé derrière. Au fur et à mesure que les électrons percutent l'écran se dessinent les franges d'interférence : la figure 7 montre l'écran après 200 impacts, 1 000 impacts et 5 000 impacts.

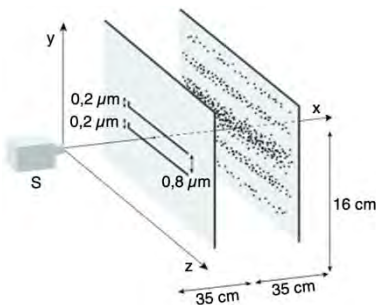


Figure 6 : Schéma du dispositif¹⁷ expérimental d'interférences par franges d'Young d'électrons émis un à un par un canon électrons S

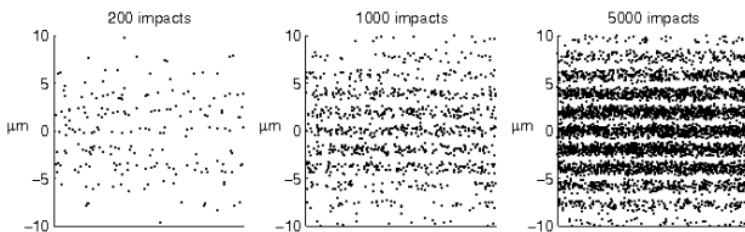


Figure 7 : Aspect de l'écran après 200, 1 000 et 5 000 impacts d'électrons¹⁷

¹⁷ Claus JÖNSSON, *Zeitschrift für Physik* 161, 1961, p. 454. Trad. angl. : *id.*, « Electron diffraction at multiple slits », *American Journal of Physics* 42-1, 1974, p. 4-11.

Cette expérience, réalisée avec des électrons dont on connaît le caractère « matériel » (un électron possède une charge électrique $1,6 \times 10^{-19}$ C et une masse $9,1 \times 10^{-31}$ kg) invalide l'interprétation de l'École de Copenhague, et montre que la particule est *à la fois* onde et matière, conformément à l'interprétation d'Einstein, de Broglie et Bohr, soigneusement discutée dans l'ouvrage de Gondran¹⁸ dont on pourra consulter un extrait sur site Web¹⁹. C'est cette interprétation qui est privilégiée dans le texte cité, d'après en particulier une modélisation de l'impact des électrons en fonction de la distance entre l'écran et les fentes. Dans cette optique, la particule est « attachée » à son onde et guidée par elle, un peu comme un surfeur sur une vague, qui est guidé par la vague : la particule passe bien soit par une fente, soit par l'autre, mais l'onde qui lui est associée passe par les deux fentes, ce qui guide la trajectoire de la particule et lui fait impacter l'écran de façon privilégiée aux endroits des franges d'interférence constructives.

Cette expérience a même été réalisée avec des molécules de fullerène C60²⁰ et de phtalocyanine. Ces molécules sont de taille mésoscopique : la molécule de fullerène C60 comporte 60 atomes de carbone assemblés en 20 hexagones et 12 pentagones, elle ressemble à un ballon de football, son diamètre est de l'ordre du nanomètre. On conçoit difficilement que ces molécules puissent disparaître en laissant place à leur onde jusqu'aux fentes puis réapparaître ensuite pour percuter l'écran.

Ainsi à toute particule de matière (palpable) doit être associée une onde (impalpable), qui se déplace en même temps que la particule.

6. La matière et le vide

6.1. La matière est pleine de vide

On sait que « la culture, c'est ce qui reste quand on a tout oublié²¹ ».

De la même façon, le vide, c'est ce qui reste quand on a tout retiré, sauf le vide²². Car lorsqu'on retire le vide, il reste le néant !

Donc le vide n'est pas rien, c'est même l'un des objets les plus étranges de la mécanique quantique ! Mais auparavant, rappelons quelques données (tableau 2) :

¹⁸ Michel & Alexandre GONDRAAN, *Mécanique quantique. Et si Einstein et De Broglie avaient aussi raison ?* Paris, Éditions Matériologiques, 2014.

¹⁹ <https://thequantumphysics.wordpress.com/interpretation-de-lexperience-des-fentes-de-young/>

²⁰ Olaf NAIRZ, Markus ARNDT et Anton ZEILINGER, « Quantum interference experiments with large molecules », *American Journal of Physics* 71, n° 3, 2003, p. 19-325.

²¹ Citation attribuée à André Malraux (dictée géante du 7 octobre 2024), mais aussi à Selma Lagerlöf par Karl Petit dans son *Dictionnaire des citations du monde entier* (éd. Marabout, 1960). En fait elle revient pour la France à Édouard Herriot (Denis DE ROUGEMONT, « Qu'est-ce que la culture ? Quatre thèses et une hypothèse », *Cahiers de l'Alliance culturelle romande*, Genève, juin 1972, p. 7-9) qui la cite dans le premier tome de ses mémoires (*Jadis*, sous-titré *Avant la première guerre mondiale*, Paris, Flammarion, 1948, p. 104) qui l'attribue lui-même à un auteur inconnu, en fait une dame de lettres suédoise, Ellen KEY, notamment dans son essai sur l'éducation (*Bildning. Några synpunkter* (« Éducation »), Stockholm 1897, p. 12). On aura plus de détails en consultant la chronique de LE SONGEUR parue dans « Les Juédis du Songeur », AFBH – éd. de Beaugies, n° 101, accessible sur le site <https://www.editionsdebeaugies.org/juedi101.php>.

²² Je ne connais pas l'auteur de cette définition. Voir Étienne KLEIN, *Ce qui est sans être tout à fait, essai sur le vide*, Arles, Actes Sud, 2019.

Distance Terre–Soleil	149 597 870 km	Taille d'un atome	5×10^{-11} à 3×10^{-10} m
Rayon du Soleil	696 340 km	Taille d'un noyau	10^{-15} à 10^{-14} m
Rayon de la Terre	6 371 km	Taille d'un électron	inférieure à 10^{-22} m

Tableau 2 : Quelques données atomiques et cosmologiques

À partir des données du tableau 2, on peut faire deux remarques :

- Si l'on réduisait l'orbite de la Terre à la dimension d'un terrain de football, le Soleil serait un ballon d'environ 50 cm de diamètre au centre, et la Terre serait une bille de 4 millimètres de diamètre courant autour du stade ;
- Si l'on agrandissait un atome à la dimension d'un terrain de football, le noyau serait une bille d'un millimètre à un centimètre de diamètre au centre, les électrons seraient des puces d'un nanomètre de diamètre courant dans tous les sens tout autour du stade.

Ainsi, toutes proportions gardées, il y a encore plus de vide à l'intérieur d'un atome qu'à l'intérieur de notre système solaire. Étant donné que l'atome est de la matière, on voit que la matière est pleine de vide²³ !

6.2. Les fluctuations du vide

Non seulement le vide n'est pas rien, mais encore le vide n'est pas vide ! En effet, il est traversé de rayonnements électromagnétiques : les rayons lumineux (la lumière des étoiles) et toutes sortes de rayons cosmiques, rayons X, rayons gamma, neutrinos, etc. qui sont tous aussi des particules. De sorte que le vide est ainsi l'un des objets les plus étranges de la mécanique quantique.

En mécanique quantique en effet, la relation d'incertitude de Heisenberg nous enseigne qu'on ne peut pas mesurer simultanément la vitesse et la position d'une particule. L'incertitude Δx sur la position et l'incertitude Δv_x sur la vitesse d'une particule de masse m sont liés par :

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq h/4\pi m$$

où h est la constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js).

Ceci implique qu'une particule ne peut pas être au repos. En effet, le repos est défini par une position fixe et une vitesse nulle (donc connue) à cette position. Donc les particules dans le vide ont une énergie. La plus basse énergie qu'elles puissent avoir est l'énergie du vide. Le vide quantique occupe l'ensemble de l'univers. Il possède une énergie présente en tout point de l'espace appelée « énergie du vide ».

Le principe d'incertitude de Heisenberg peut prendre une autre forme :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$$

Cette relation signifie que la variation d'énergie du vide ΔE **ne peut pas être nulle, c'est-à-dire que l'énergie du vide fluctue** en permanence autour de sa valeur moyenne. Ainsi, sur un laps de temps $\Delta t = 1$ seconde, $\Delta E \geq 0,510^{-34}$ J, ce qui est infime et ne se voit pas, mais sur un intervalle de temps très petit, par exemple $\Delta t = 10^{-22}$ s, une énergie

²³ Les objets de notre système solaire sont, comme il vient d'être dit, peu compacts. La masse volumique des corps usuels est de quelques grammes par centimètre cube (eau : 1 g/cm³ ; fer : 7,87 g/cm³ ; plomb : 11,35 g/cm³). La masse volumique moyenne de la Terre est de 5,51 g/cm³, celle du Soleil, constitué essentiellement d'hydrogène, est en moyenne de 1,41 g/cm³, mais vaut 150 g/cm³ en son centre. Mais il existe dans l'univers des objets considérablement plus compacts, telles les étoiles-neutrons dont la masse volumique est de 1 000 millions de tonnes par centimètre cube ! Ici la matière est pleine de matière...

supérieure à $\Delta E = 0,53 \times 10^{-12}$ J, soit environ 3 MeV, peut être générée, résultant en la création spontanée d'une paire particule-anti-particule (un électron et un positron de masses 0,511 MeV chacun). Une telle paire est dite « virtuelle » car les deux particules formées se recombinent immédiatement, avant qu'on ait eu le temps de les observer, restituant au vide l'énergie qui les avait fait naître. Ainsi (voir figure 8) le vide est-il le siège permanent de fluctuations d'énergie résultant en la création et la disparition instantanées de particules et d'antiparticules (= de matière et d'antimatière).



Figure 8 : Schéma d'une fluctuation du vide²⁴

Ces effets ne sont pas directement observables (pour le moment !) car trop rapides. Cependant, en présence de champs de forces très intenses, il est possible de séparer la particule et l'antiparticule. C'est par exemple le cas dans l'effet Schwinger, schématisé figure 9, et qui a pu être récemment simulé sur du graphène²⁵.

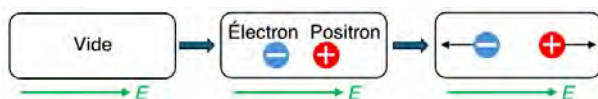


Figure 9 : Représentation schématique de l'effet Schwinger²⁴

Les conséquences des fluctuations du vide se manifestent : nous connaissons actuellement deux preuves expérimentales de ces fluctuations du vide : l'effet Casimir, et le décalage de Lamb.

6.3. L'effet Casimir

Cet effet utilise la pression de radiation : on sait qu'un champ électromagnétique frappant une surface (= des photons bombardant une surface) exerce une pression sur cette surface, dite « pression de radiation », à tel point qu'on envisage de faire voyager dans l'espace intersidéral des vaisseaux dont le moteur serait constitué par une immense voile poussée par le rayonnement électromagnétique (= la lumière du Soleil en particulier).

L'effet Casimir a été prédit théoriquement en 1948 par le physicien néerlandais Hendrik Casimir²⁶ : deux plaques métalliques parfaitement conductrices mais électriquement neutres placées parallèlement l'une à l'autre dans le vide s'attirent. Ceci est dû à la pression de radiation des champs électromagnétiques créés par les fluctuations du vide. En effet, les plaques étant parfaitement conductrices, le champ électrique à leur surface doit être nul. Par conséquent, les champs électromagnétiques (= des photons) qui se créent entre les plaques doivent être tels que la distance d entre les plaques soit un multiple de leur demi-longueur d'onde (figure 10a), soit $d = k\lambda/2$ où k est un nombre entier ($k \geq 1$), c'est-à-dire $\lambda = 2d/k$. Par conséquent, seuls les photons de petite longueur d'onde ($\lambda \leq 2d$) peuvent se créer entre les plaques, ces photons tendent à éloigner les plaques l'une de l'autre.

²⁴ D'après : <https://www.college-de-france.fr/sites/default/files/media/document/2024-11/Combes%202024-2025%20-%20Séminaire%2018%20novembre%20Vennin.pdf>

²⁵ Aurélien SCHMITT *et alii*, « Mesoscopic Klein-Schwinger effect in graphene », *Nature Physics* 19, 2023, p. 830-835. Voir aussi : <https://www.ens.psl.eu/actualites/physique-quantique-l-effet-schwinger-observe-l-echelle-mesoscopique>.

²⁶ Hendrick B. G. CASIMIR, *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 51, 1948, p. 793-795 [p. 793].

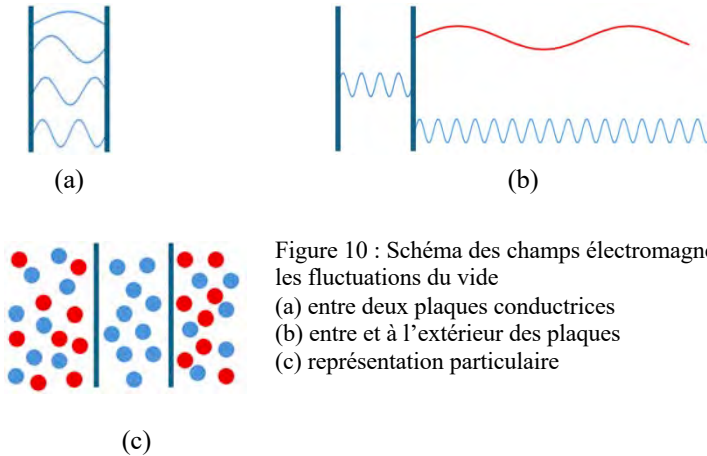


Figure 10 : Schéma des champs électromagnétiques créés par les fluctuations du vide

(a) entre deux plaques conductrices

(b) entre et à l'extérieur des plaques

(c) représentation particulaire

Mais à l'extérieur des plaques, peuvent se créer non seulement les champs de petite longueur d'onde (représentés en bleu sur la figure 10b), mais aussi ceux de plus grande longueur d'onde (représentés en rouge sur la figure 10b), ce qui est schématisé figure 10c par les particules (= photons) respectivement en bleu et en rouge. Ces photons extérieurs tendent à rapprocher les plaques l'une de l'autre. Étant donné qu'ils sont en nombre bien supérieur aux photons créés entre les deux plaques, c'est cet effet qui l'emporte, de sorte que le bilan est que les plaques tendent à se rapprocher l'une de l'autre et semblent s'attirer. Cet effet a été démontré expérimentalement en 1997²⁷.

Remarquons que l'effet Casimir possède un analogue tout à fait classique et qui n'a rien à voir avec la mécanique quantique : deux navires faisant route côte à côte ou stationnant côte à côte ont tendance à se rapprocher l'un de l'autre. Ceci est dû au fait qu'entre les deux navires, seules de petites vagues peuvent se former, qui ont tendance à éloigner les navires l'un de l'autre, alors qu'à l'extérieur de cet espace peuvent se former non seulement les mêmes petites vagues, mais aussi de plus grosses, qui ont tendance à rapprocher les navires l'un de l'autre. Les vagues extérieures étant plus nombreuses et importantes, le bilan est que les navires se rapprochent.

6.4. Décalage de Lamb

La mécanique quantique nous dit que les deux orbitales (notées $^2S_{1/2}$ et $^2P_{1/2}$) de l'atome d'hydrogène doivent avoir la même énergie. Or, en étudiant le spectre microonde de l'atome d'hydrogène, les physiciens Willis Eugene Lamb et Robert Retherford²⁸ remarquent en 1947 un écart d'énergie entre ces deux niveaux.

Comme nous l'avons vu, un atome est essentiellement « rempli de vide » : autour du noyau de l'atome d'hydrogène, le vide fluctue en permanence, donnant naissance à des paires d'électrons-positrons. Avant que ceux-ci n'aient eu le temps de se recombiner, l'électron de l'atome d'hydrogène interagit ainsi un très court instant avec les positrons, ce qui provoque une très légère modification de l'orbite de l'électron, entraînant un écart d'énergie entre les deux niveaux de l'atome.

²⁷ Steven K. LAMOREAUX (6 janvier 1997), « Demonstration of the Casimir Force in the 0,6 to 6 μm Range », *Physical Review Letters* 78-1, 1997, p. 5-8.

²⁸ Willis E. LAMB, Robert C. RETHERFORD (1947), « Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method », *Physical Review Letters* 72-3, 1947, p. 241-243.

6.5. Évaporation de trous noirs

Les fluctuations du vide ne se manifestent pas seulement à l'échelle des particules élémentaires, elles peuvent avoir un effet sur le cosmos.

Ainsi, en 1975, Stephen Hawking a prédit un phénomène « d'évaporation de trous noirs ». Aux abords d'un trou noir, le champ gravitationnel est si intense qu'il permet de séparer les paires particule-antiparticule créées par les fluctuations du vide quantique. Une des deux particules est absorbée par le trou noir, l'autre est rejetée (figure 11), émettant ainsi une radiation (tellement faible qu'aucune n'a pu être observée jusqu'à présent).

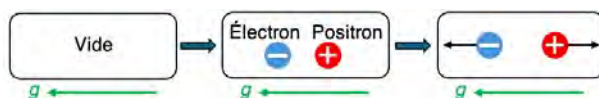


Figure 11 : Séparation particule – anti-particule par un champ gravitationnel intense¹⁴

La particule engloutie se recombine à une particule du trou noir, diminuant d'autant sa masse, de sorte que le trou noir s'évapore progressivement. En fait, les calculs montrent que cette évaporation est extrêmement lente²⁹ : pour un trou noir dont la masse serait égale à celle du Soleil, le temps d'évaporation serait 10^{57} fois plus grand que l'âge de l'univers, il descendrait à l'âge de l'univers pour un trou noir de masse 10^{19} fois plus faible que la masse solaire, soit un milliard de tonnes. Nous ne sommes donc pas prêts de voir s'évaporer un trou noir !

6.6. Expansion de l'Univers

On pense que les fluctuations du vide sont à l'origine de la structure de l'Univers. Après le Big Bang, pendant les quelques 10^{-32} secondes qu'a duré l'inflation, les fluctuations du vide ont créé des variations d'énergie qui ont donné naissance à des inhomogénéités de distribution de matière. Avec l'expansion de l'univers, ces inhomogénéités ont évolué pour former des étoiles, galaxies et autres structures cosmiques. Ainsi les fluctuations quantiques du vide sont actuellement considérées comme étant un mécanisme fondamental qui a contribué à construire la structure de notre univers.

Ainsi le vide n'est pas vide, il contient de l'énergie, qui sans cesse se transforme en matière et antimatière qui aussitôt s'annihilent pour restituer l'énergie empruntée.

7. Et la matière grise ?

Souvenons-nous de la définition de la matière donnée par le dictionnaire Larousse citée en introduction : « litt. : chose physique, corporelle, par opposition à l'esprit, à l'âme ».

Parler des relations entre la matière et l'esprit, c'est entrer dans le domaine de la métaphysique, un domaine qui a fait réfléchir l'homme depuis probablement les débuts de l'humanité.

Platon (~ 427-347 av. J.-C.) considère que l'esprit et la matière sont séparés. L'âme est immatérielle et immortelle, elle est apparentée au divin, le corps est fait de matière et il est mortel. L'âme naît avant le corps puis s'incarne dans celui-ci, et lui survit lorsque le corps meurt. On peut voir probablement dans cette conception la peur de l'homme devant la mort, l'homme survit à la mort par le biais de son esprit.

Chez Aristote (384-322 av. J.-C.) il y a distinction entre âme et corps, mais pas séparation réelle : l'âme et le corps ensemble caractérisent les êtres vivants.

²⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Évaporation_des_trous_noirs.

Lucrèce (Titus Lucretius Carus, ~ 98-55 av. J.-C.) au contraire, assimile l'esprit et la pensée à de la matière, à cause des effets qu'un dérangement de l'esprit peut avoir sur le corps et réciproquement, ces répercussions ne pouvant s'effectuer que par contact entre substances matérielles. « [...] Ce même raisonnement nous enseigne que la substance de l'esprit et de l'âme est matérielle³⁰ », et il localise l'esprit au milieu de la poitrine !

Pour Descartes, tout être matériel s'étend dans l'espace, contrairement aux êtres immatériels qui n'ont pas d'étendue. D'où la thèse de « l'animal-machine » (le corps de l'animal, y compris l'homme, est étendu mais n'a pas d'âme) par opposition à l'âme ou à l'esprit, entité pensante mais qui ne peut être localisée. Comme on peut le voir, les définitions de nos dictionnaires sont l'héritage de cette pensée.

Ceci peut se traduire schématiquement en langage moderne et imagé par la figure 12 : un esprit sans corps fait du stop (a) en espérant qu'un corps sans âme passe à proximité (b) pour s'associer à lui en entrant dans son cerveau (c)...

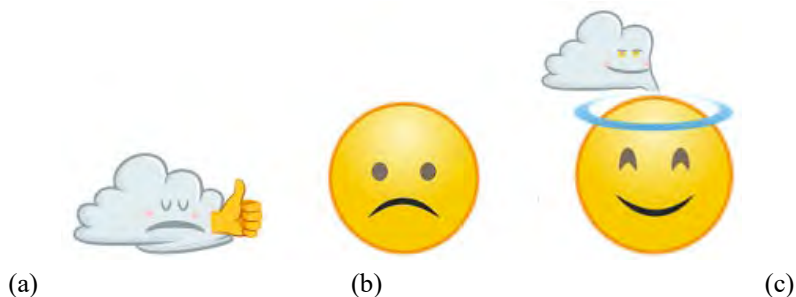


Figure 12 : Représentation (très schématique...) de l'esprit et du corps

On notera que la figure 12 contient volontairement une erreur. Le lecteur qui ne la découvrirait pas trouvera la solution en lisant la note de bas de page suivante³¹.

Inspiré par « l'animal-machine » de Descartes, Julien Offray de La Mettrie (1709-1751) s'en écarte et rejette « cet absurde système [...] que les bêtes sont de pures machines³² ». Il est en effet médecin, et sa pensée se fonde sur ses observations et non sur des préjugés. Pour lui, l'esprit n'est pas une entité distincte du corps, mais au contraire résulte de l'organisation de la matière dans le cerveau humain³³, traitant ainsi la question de la conscience en dehors de toute considération métaphysique et religieuse, tout comme Copernic et Galilée l'avaient fait autrefois dans leur représentation du cosmos. On parle beaucoup de la révolution spirituelle qu'a provoquée la théorie héliocentrique de Copernic et Galilée un siècle plus tôt, et pratiquement personne ne connaît La Mettrie. Pourtant sa théorie est au moins aussi révolutionnaire que l'héliocentrisme.

Il est très intéressant de lire l'éloge funèbre que Frédéric II, roi de Prusse³⁴, prononça à la mort de La Mettrie :

³⁰ LUCRÈCE, *De natura rerum* III, v. 137-177.

³¹ Le personnage de la figure 12b est triste car son corps n'a pas encore trouvé l'âme avec laquelle s'associer. Or la tristesse est un état d'âme : ce personnage ne peut donc pas avoir d'état d'âme puisqu'il n'a pas encore d'âme.

³² Julien de LA METTRIE, *L'homme machine*, Leyde, De l'imp. d'Élie Luzac, Fils, 1748.

³³ *Id.*, *Histoire naturelle de l'âme*, traduite de l'Anglois de M. Charp, par Feu M. H** de l'Académie des Sciences, &c., À la Haye, chez Jean Naulme, 1745, cité par Wikipedia (https://fr.wikipedia.org/wiki/L%27Homme_Machine).

³⁴ Frédéric II n'écrit de toute sa vie que deux éloges funèbres, l'un pour J. de La Mettrie (1751), l'autre pour Voltaire (1778).

Il porta hardiment le flambeau de l'expérience dans les ténèbres de la métaphysique ; il tenta d'expliquer, à l'aide de l'anatomie, la texture déliée de l'entendement ; et il ne trouva que de la mécanique où d'autres avaient supposé une essence supérieure à la matière. Il fit imprimer ses conjectures philosophiques sous le titre *d'Histoire naturelle de l'âme*. L'aumônier du régiment sonna le tocsin contre lui ; et d'abord tous les dévots crièrent. Mais les théologiens, [...] s'obstinèrent à trouver des semences d'hérésie dans un ouvrage qui traitait de physique³⁵...

Aujourd'hui tous les neurobiologistes s'accordent pour dire que toutes les activités intellectuelles dépendent de la matière contenue dans le cerveau, en particulier en étudiant les relations entre les troubles du comportement et les lésions cérébrales. C'est Paul Broca qui, le premier, en 1861, en étudiant l'aphasie³⁶, démontra que la capacité du langage, jusque-là attribuée à l'âme, était localisée dans une zone précise du cortex cérébral : en observant, *post mortem*, que le cerveau d'un patient, devenu incapable de parler à la suite d'un accident vasculaire cérébral, présentait une zone détruite dans le lobe frontal gauche, il en déduisit que cette région jouait un rôle dans le processus du langage.

Aujourd'hui, les différentes techniques de neuro-imagerie fonctionnelle (examen *post mortem*, IRM, scanner, tomographie par scintigraphie, ...), permettent de caractériser le cerveau en action, en localisant et mesurant le signal produit par l'activité cérébrale d'un patient qui effectue une tâche cognitive. Ainsi, par exemple, il est possible de situer dans le cortex préfrontal l'inhibition frontale, qui est la faculté de réprimer les élans réflexes, les impulsions et les réponses automatiques du cerveau, au profit d'une pensée mieux organisée, plus réfléchie et pesée³⁷. Si le nombre de neurones est génétiquement déterminé à notre naissance, le nombre de synapses évolue jusqu'à l'âge de 15 ans, ainsi que pendant toute la vie l'organisation du cerveau, en fonction des maladies et des divers contacts avec l'environnement. C'est en particulier le cas des lobes frontaux qui évoluent très lentement, modelant petit à petit notre capacité à gouverner nos passions et à peser les conséquences de nos actions, d'où par exemple la différence entre la spontanéité de l'enfant et le comportement plus posé à l'âge adulte. Et l'on constate aussi une modification inverse du comportement en cas de dégradation physiologique du cortex préfrontal.

Ainsi, grâce à l'évolution de la matière, l'esprit peut évoluer au cours du temps en chaque individu et se transmettre de générations en générations.

L'esprit (impalpable) naît donc de l'organisation de la matière (palpable). Non seulement esprit et matière ne font qu'un, mais encore toutes les fonctions engendrées par l'esprit (la parole, la pensée, la conscience...) disparaissent avec la matière qui a créé l'esprit. Et réciproquement, ce que l'on considère souvent comme la vraie mort aujourd'hui est la mort cérébrale, c'est-à-dire la disparition des manifestations de l'esprit, plus que la mort clinique par cessation du fonctionnement des organes vitaux de la matière qui compose notre corps.

³⁵ Bernard GRABER, « La Mettrie (1709-1751) », *Raison Présente* 172, 2009, p. 107-117 [p. 109], accessible en ligne https://www.persee.fr/doc/raipr_0033-9075_2009_num_172_1_4198?q=Julien+Offray+de+la+Metttrie.

³⁶ Affection neurologique caractérisée par une perturbation de l'expression ou de la compréhension du langage parlé et écrit, à la suite d'une lésion du cortex cérébral (dictionnaire Larousse).

³⁷ Pierre-Marie LLEDO, « Mettre en pause l'intuition pour favoriser la réflexion », *Polytechnique insights* 192, 2026, consultable en ligne : <https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/neurosciences/mettre-sur-pause-son-intuition-pour-favoriser-la-reflexion/>.

Évidemment, les transhumanistes s'emparent de cet aspect matérialiste de l'esprit en prétendant vouloir et pouvoir tout rationaliser au détriment de l'aspect émotionnel qui joue un rôle essentiel dans le comportement humain.

Comme l'a dit Jean d'Ormesson : « Il y a quelque chose de plus fort que la mort, c'est la présence des absents dans la mémoire des vivants. » L'esprit peut ainsi subsister au-delà de la mort par le truchement de la mémoire des survivants et donc se transmettre de générations en générations.

8. Conclusion

La science nous révèle des phénomènes extraordinaires :

- La matière, chose palpable, visible et mesurable, est aussi énergie, chose mesurable, mais invisible et impalpable, capable de développer des puissances considérables : la ville d'Hiroshima a été détruite par l'énergie contenue dans environ 0,7 grammes de matière seulement. La matière semble être la forme que prend l'énergie lorsqu'elle est concentrée dans un très petit volume ;
- L'antimatière existe, on n'en voit pas mais on sait en fabriquer, on l'utilise même pour suivre l'évolution d'un cancer, et on peut la conserver (en infime quantité il est vrai) : l'antimatière est donc aussi de la matière, palpable, mais qu'il vaut mieux ne pas palper, au risque de disparaître avec elle pour nous transformer en énergie...
- L'univers connu est constitué à 95 % d'énergie noire impalpable dont on soupçonne l'existence mais dont on ignore tout, et de matière noire palpable mais non encore palpée.
- La particule, l'atome, la molécule, et donc la matière palpable se déplace avec l'onde impalpable qui lui est associée, tel un surfer sur sa vague ;
- La matière palpable est pleine de vide impalpable. Mais le vide n'est pas vide et contient de l'énergie impalpable qui fluctue sans cesse pour soudain se transformer en matière et antimatière palpables mais trop fugaces qui s'annihilent aussitôt pour redevenir énergie impalpable ;
- De l'organisation de la matière palpable du cerveau naît l'esprit, ô combien impalpable, qui se promène avec sa matière comme l'onde avec sa particule, évolue au fur et à mesure que se transforme la matière qui l'a engendré, puis disparaît avec la matière qui l'a créé mais qui subsiste d'une certaine manière en se transmettant partiellement de génération en génération, donnant ainsi une part d'immortalité à la matière disparue qui l'a créé.

Ainsi du vide immatériel impalpable peut naître matière et antimatière palpables, et de l'organisation de la matière palpable peut naître l'esprit immatériel impalpable...

La science, vous le voyez, peut nous faire rêver car, en nous faisant découvrir l'inconcevable, elle nous permet d'imaginer l'inimaginable. Elle n'est pas seulement l'objet de notre curiosité ou source de savoir, elle est aussi source d'innovations technologiques qui modifient, voire bouleversent notre environnement et notre vie, à condition bien sûr que nous prenions garde à nous prémunir contre les dangers inhérents à toute nouveauté technique. Et en nous dévoilant ses mystères, d'une part elle nous fait découvrir l'océan de notre ignorance, d'autre part elle est susceptible de constituer une puissante source d'inspiration pour les artistes, les écrivains et les poètes.

J'espère vous avoir donné matière... impalpable... à réfléchir.

Je vous remercie pour votre attention, qui était tout à fait palpable...