



Université catholique de Louvain – École de physique

Chemin du Cyclotron 2, Louvain-la-Neuve

Auditoire B.328, bâtiment de Hemptinne, 3^e étage

Colloque de Physique – LPHY2505 Fondements et notions fondamentales

Lundi 25 février 2013 à 16 h 15

Jean PESTIEAU¹
Professeur émérite UCL



Contact : Patricia de Grave-Radelet

Les trois grandeurs dimensionnelles fondamentales

Temps, longueur et masse (énergie)

¹ jean.pestieau@gmail.com, attaché à l'Inem, 68, rue de la Caserne, 1000 Bruxelles..

Résumé

Le thème qui m'intéresse est celui des trois grandeurs physiques fondamentales de la mécanique classique (temps, longueur et masse) qui sont devenues les trois grandeurs fondamentales de l'ensemble de toute la physique. Elles sont passées au travers de l'acoustique, de la thermodynamique, de la physique relativiste comme de la quantique, etc. La loi de la conservation de l'énergie a été cruciale dans cette généralisation, une fois que l'énergie a été comprise comme un concept fondamental gardant son identité alors qu'elle se transforme en différentes formes, comme cela a été vu avec éclat dans le développement des moteurs, la photosynthèse, la production et l'annihilation des particules élémentaires, etc. Mon approche, en partie, est proche de celle de Lev Okun (voir par exemple : arxiv.org/pdf/physics/0110060).

Depuis des milliers d'années, pour mener à bien leurs activités productives, commerciales, etc., les hommes et les femmes utilisent trois grandeurs physiques : la longueur, l , le temps, t , et la masse, m , ou plus exactement le poids. Elles ont été utilisées d'abord séparément et de plus en plus en relation entre elles.

L'avènement de la mécanique classique et son hégémonie au 18^e siècle ont rendu manifeste le caractère fondamental de ces trois grandeurs physiques étroitement liées entre elles dans le domaine de la mécanique rationnelle.

La loi de conservation d'énergie met en relation l'énergie cinétique, l'énergie gravitationnelle, la chaleur, l'énergie apparaissant dans les réactions chimiques et au travers des champs classiques (électromagnétisme, acoustique...) Chaque fois, les lois de la physique s'expriment en termes des trois grandeurs fondamentales : temps, longueur, masse.

Le 20^e siècle s'est ouvert avec la théorie de la relativité spéciale et la physique quantique accompagnée respectivement des constantes fondamentales de la nature c (vitesse de la lumière) et h (constante de Planck). La masse apparaît comme une forme particulière d'énergie [$E = mc^2$, dans le repère où la particule est au repos]. Temps, longueur et énergie sont intrinsèquement liés.

Il apparaît aujourd'hui que la masse de la matière ordinaire, composée principalement de noyaux atomiques est à plus de 95 % de l'énergie cinétique « cristallisée » (QCD) et que la masse des particules des particules élémentaires (quarks, leptons, W et Z) est produite par le mécanisme de Brout-Englert-Higgs.

Introduction

- « [Avec Karl Marx], l'histoire a été posée pour la première fois sur son véritable terrain. Le fait évident que les hommes, avant tout, mangent, boivent, s'abritent et s'habillent et qu'ils doivent travailler avant de pouvoir lutter pour le pouvoir, s'occuper de politique, de religion et de philosophie, ce fait manifeste, jusqu'à présent complètement négligé, a enfin obtenu droit de cité dans l'histoire ». [Engels 1877]

Dans leurs activités quotidiennes pour vivre et survivre les 7 milliards d'êtres humains d'aujourd'hui, descendants des quelques 10 millions du néolithique,

disposent toujours de détecteurs qui leur permettent de sélectionner les informations qui peuvent leur être utiles. Ce sont leurs sens : la vue, l'ouïe, le toucher, l'odorat, le goût et le sens kinesthésique. Ils disposent également d'une certaine force physique et surtout d'un cerveau bien plus développé que celui des autres primates qui leur permet d'aller bien au-delà de la perception immédiate.

Systèmes sensoriels

- “To begin, we build our world-models from strange raw materials: signal-processing tools "designed" by evolution to filter a universe swarming with information into a very few streams of incoming data.
- Data streams ? Their more familiar names are vision, hearing, smell, and so forth. From a modern point of view, vision is what samples the electromagnetic radiation that passes through a tiny hole in our eyes, picking up only a narrow rainbow of colors inside a much broader spectrum. Our hearing monitors air pressure at our eardrums, and smell provides a quirky chemical analysis of the air impinging on our nasal membranes. Other sensory systems give some rough information about the overall acceleration of our body (kinesthetic sense), temperatures and pressures over its surface (touch), a handful of crude measures of the chemical composition of matter on our tongue (taste), and a few other odds and ends.
- Those sensory systems allowed our ancestors -- just as they allow us -- to construct a rich, dynamic model of the world, enabling them to respond effectively. The most important components of that world-model are more-or-less stable objects (such as other people, animals, plants, rocks... the Sun, stars, clouds...) some of them moving around, some dangerous, some good to eat, and others — a select and especially interesting few — desirable mates.
- Devices to enhance our senses reveal a richer world. When Antonie van Leeuwenhoek looked at the living world through the first good microscopes in the 1670s, he saw totally unsuspected, hidden orders of being. In short order he discovered bacteria, spermatozoa, and the banded structure of muscle fibers. Today we trace the origin of many diseases (and of many benefits) to bacteria. The basis of heredity (well, half of it) is found within the tiny spermatozoa. And our ability to move is anchored in those bands. Likewise, when Galileo Galilei first turned a telescope to the sky in the 1610s, new riches appeared: he found spots on the Sun, mountains on the Moon, moons around Jupiter, and multitudes of stars in the Milky Way ».
- But the ultimate sense-enhancing device is a thinking mind. Thinking minds allow us to realize that the world contains much more, and is in many ways a different thing, than meets the eye. Many key facts about the world don't jump out to our senses. The parade of seasons, in lock-step with the yearly cycle of sunrise and sunset, the nightly rotation of stars across the sky, the more intricate but still predictable motions of the Moon and planets, and their connection with eclipses — these patterns do not leap to the eye, ear, or nose. But thinking minds can discern them. And having noticed those regularities, thinking minds soon discover that they are more regular than the rules of thumb that guide our everyday plans and expectations. The more profound, hidden regularities lend themselves to counting and to geometry: in short, to mathematical precision ». [Wilczek, 2008]

Pour cultiver un champ, pour construire un bâtiment, pour fabriquer une étoffe, etc. et pour échanger des marchandises, il faut des poids et mesures. Pour savoir combien de jours il reste avant la saison des pluies ou avant le printemps (afin de prévoir des réserves suffisantes de nourriture, par exemple), pour prévoir le nombre d'heures qu'il reste avant la fin du jour, il faut avoir une certaine estimation du temps. Temps, longueur et masse² sont des quantités directement quantifiables, en opposition avec l'odeur et le goût des aliments par exemple.

Depuis des milliers d'années, des efforts considérables — accélérés par la révolution industrielle anglaise et la Révolution française — ont été réalisés pour avoir un système d'unités de mesure des grandeurs fondamentales.

- « D'après Flavius Josèphe³, historien des *Antiquités judaïques*, l'origine des poids et mesures remonterait à Caïn. Outre qu'il tua son frère, le fils maudit d'Adam fut aussi le tout premier géomètre et le tout premier urbaniste. Puis, pour compléter la longue liste de ses péchés, "il détruisit l'insouciance où vivaient précédemment les hommes, par l'invention des mesures et des poids". » [Adler 2002]

Le calendrier

Pour mettre fin à la confusion du calendrier⁴ qui le précédait – en décalage de deux mois avec les saisons – Jules César décida qu'à partir de 47 av. J.-C., le calendrier devait être remis en concordance avec les saisons. Le mois de février devait avoir 29 jours tous les quatre ans. L'année bissextile était née. Au cours des siècles qui suivirent, une erreur introduite dans le calendrier, et qui correspondait à un jour tous les 128 ans, prit de l'importance en raison de sa répétition.

En 1582⁵, le pape Grégoire XIII décréta que l'année en cours serait écourtée de dix jours. Le Pape ordonna également une révision des années bissextiles qui introduisait une suppression de trois années bissextiles tous les quatre cents ans. L'erreur admise par le calendrier grégorien n'était donc que d'un jour tous les 3 323 ans. C'était une réforme rationnelle. Les pays catholiques suivirent le Pape.

Les protestants du continent rechignèrent à l'adopter, mais cela ne dura pas longtemps face aux nécessités du commerce. L'Angleterre antipapiste s'obstina à garder le vieux calendrier julien jusqu'en 1752. Mais la révolution industrielle valait bien une concession aux papistes !

L'Église orthodoxe russe était tout autant opposée aux papistes. Il a fallu attendre le gouvernement révolutionnaire russe pour qu'en 1918, l'année soit écourtée de 13 jours et que soit adopté le calendrier grégorien. C'est ainsi que la révolution du 25 octobre 1917 est célébrée dorénavant le 7 novembre. [Goudsmit 1966]

² poids = masse × g. g est l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre. g est approximativement égal à 9,81 m/s²

³ Flavius Josèphe, environ 37 à 100 après J.-C. Caïn est ainsi l'ancêtre *du Bureau International des Poids et Mesures* (France) et du *National Institute of Standards and Technology* (États-Unis).

⁴ Une année tropicale (d'équinoxe à équinoxe) = 365,24 jours. À noter que l'année sidérale (d'étoile fixe à étoile fixe) = 365,26 jours.

⁵ Le procès de Galilée date de 1633.

Un calendrier mondial⁶, rationnel par le fait qu'il est le même chaque année et diffère peu du calendrier grégorien a été proposé à la Société des Nations et puis aux Nations Unies. Les États-Unis y ont mis leur veto en 1955 sous la pression de protestants fondamentalistes et de juifs orthodoxes.

La mesure de la longueur

Pendant des millénaires, les mesures ont eu en grande partie un caractère subjectif. La métrologie moderne, au contraire, est appliquée à des objets et situations en utilisant des unités de mesure abstraites définies par rapport à un étalon de référence.

Le cas de la France

À la veille de la Révolution française, on estimait « que, derrière quelque huit cents appellations, la France de l'Ancien Régime cachait la quantité prodigieuse de 250 000 unités de poids et mesures différentes »
« De nombreuses mesures de l'Ancien Régime, notamment celles qui étaient liées au monde de la production, avaient à l'origine une signification anthropométrique, dérivée des besoins ou des intérêts de l'homme. (...) Bien souvent, un grand nombre de ces mesures représentaient la quantité de travail qu'une personne pouvait accomplir dans un laps de temps donné. Ainsi, dans telle région, le charbon était-il mesuré en "charges", équivalentes chacune au douzième de la production journalière d'un mineur. La terre arable était souvent mesurée en "hommées" ou en "journées" désignant la surface qu'un paysan pouvait labourer ou moissonner en un seul jour. D'autres unités exprimaient la valeur ou les qualités d'un terrain, selon l'estimation des paysans du coin. (...) En ce sens, les mesures anthropométriques de l'Ancien Régime servaient de moyen de contrôle de la productivité et masquaient en réalité l'idée même que celle-ci était une grandeur mesurable » [Adler 2002]

La métrologie moderne, au contraire, est appliquée à des objets et situations en utilisant des unités de mesure abstraites définies par rapport à un étalon de référence.

« Aujourd'hui, le système métrique sert de langage commun pour les communications de pointe, la science avant-gardiste, la production industrielle et le commerce international (...) Fait paradoxal, la première grande puissance économique mondiale reste la seule exception à la règle. (...) Les Américains en ont pris douloureusement conscience en 1999, lorsqu'ils ont perdu la sonde Mars Climate Orbiter. L'enquête de la NASA a révélé que l'une des équipes avait utilisé les mesures anglaises tandis que l'autre avait eu recours aux unités métriques ». D'où une erreur de trajectoire de 96 km et la perte de l'engin, soit 125 millions de dollars. [Adler 2002]

Définir le mètre comme 40 millionnièmes de la circonférence terrestre⁷ et appliquer cet étalon standard à l'ensemble de la société a été et est un grand pas en avant.

⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/The_World_Calendar

⁷ Le périmètre équatorial de la terre est de 40 075 017 mètres.

Dans la confusion des mesures qui existait voici des siècles, l'estimation remarquable de la circonférence de la Terre par Ératosthène (3^e siècle av. J.-C.) apparaît comme un immense exploit scientifique. Son estimation était correcte à moins de 10 % près.

Le temps long — L'apport de la géologie et de l'évolution des espèces

L'âge de l'Univers (Big Bang) est estimé aujourd'hui à 13,8 milliards d'années à 1 % près. L'âge de la Terre est estimé à 4,56 milliards d'années à 1 % près. Le système solaire est à peine plus vieux. Date des premiers micro-fossiles de bactéries : 3,40 milliards d'années ; apparition des cellules eucaryotes : 1,85 milliards d'années ; apparition des animaux multicellulaires : 0,55 milliard d'années .

Quelques évaluations de l'âge de la Terre :

- Isaac Newton l'estime à 3 998 ans avant J.-C. en se servant de la précession des équinoxes pour caler l'âge des phénomènes bibliques avec des observations astronomiques babyloniennes ou des légendes grecs.
- Johannes Kepler date son âge à 3993 ans avant J.-C.
- À la fin du 18^e siècle, James Hutton, un des fondateurs de la géologie moderne se rend bien compte qu'il a fallu un temps considérable pour réaliser ce qu'il observe. Il énonce un principe important : « L'histoire du passé de notre planète doit être expliquée à partir des faits visibles actuellement. »
- Dans son livre *De l'Origine des Espèces par la voie de la sélection naturelle* (1859), Darwin montra que les formes actuelles de la vie dérivait de formes antérieures, et que les processus de cette évolution lente avaient dû occuper de longues périodes de temps. Darwin estima que l'ensemble des processus d'évolution avaient dû prendre plusieurs centaines de millions d'années.
- Les premières estimations, par la voie de la physique, se sont basées sur le temps de refroidissement d'une Terre initialement très chaude, comme le fait Buffon qui expérimente le refroidissement de sphères métalliques de différents diamètres dans sa forge vers 1770. Il aboutit, par extrapolation linéaire aux dimensions de la Terre, à un âge de 77 000 ans.
- Lord Kelvin (William Thomson) conteste l'évaluation de Darwin. Il reprend le modèle de Buffon en supposant que le globe est rigide et homogène et en lui appliquant l'équation de la chaleur, il estime l'âge de la Terre entre 40 et 200 millions d'années.
- C'est la découverte de la radioactivité à la fin du 19^e siècle qui permettra de repousser l'âge de la Terre jusqu'à l'âge qu'on lui attribue aujourd'hui : l'essentiel de la chaleur de la Terre ne provient pas de sa chaleur initiale (qui se serait perdue en moins de 400 millions d'années), mais est produit et entretenu par la désintégration radioactive d'éléments tels que le potassium, l'uranium et le thorium. C'est aussi la compréhension de la source d'énergie du Soleil lui-même [Hans Bethe, fin des années 1930], par fusion thermonucléaire de l'hydrogène en hélium, qui a permis de lever une autre objection majeure de Lord Kelvin aux âges suggérés par les géologues : faute de prendre en compte cette source de chaleur, ses calculs suggéraient

que le Soleil n'aurait pu fonctionner plus de quelques dizaines de millions d'années. [Goudsmit 1966, Singh 2005.]

Sur l'âge de l'Univers (Big Bang)

L'hypothèse du Big Bang (Friedman-Lemaître) avait un sérieux problème dans les années 1930. En effet, les observations de Hubble d'expansion de l'Univers impliquaient un Univers de moins de 2 milliards d'années, alors que des rochers terrestres avaient au moins 3,4 milliards d'années. En 1952, l'âge de l'Univers, par de nouvelles mesures corrigeant les résultats de Hubble, monte à 3,6 milliards d'années. Début des années 1960, l'estimation est entre 10 et 20 milliards d'années [Singh 2005].

Le temps court – Les horloges

Chez *les Romains*, l'heure n'est pas le 1/24 du jour, mais le 1/12 du temps s'écoulant entre le lever et le coucher du soleil (cadran solaire). Sa longueur change donc au cours de l'année.

« L'introduction d'unités fixes, en vue de mesurer les durées du temps, fut l'œuvre des savants musulmans du début du Moyen Âge (...) » Au 8^e siècle, des scientifiques chinois développèrent des horloges à écoulement d'eau relativement précises. « Toutefois, la généralisation des heures à durée constante n'intervint qu'avec la création, en 1300, de la première horloge mécanique qui enregistrait l'écoulement du temps en comptant les périodes d'un mouvement uniforme. Ce principe est utilisé même aujourd'hui par l'horloge atomique de haute précision ». [Goudsmit 1966.]

Christian Huyghens, en 1666, met au point la première horloge à balancier et obtint une précision bien supérieure à celle obtenue auparavant, avec seulement quelques dizaines de secondes d'imprécision par jour. Pour arriver à ce résultat, il développa des principes de mécanique, précurseurs des trois lois de Newton [Speiser, 1988] et donc de la dynamique du mouvement formulée par Newton⁸, liant étroitement, temps, longueur et masse.

En 1955, les horloges atomiques (césium 133) étaient précises à une seconde près sur 300 ans. Les horloges les plus récentes présentent une erreur qui n'excède pas une seconde tous les 3 milliards d'années, ou 5 secondes sur l'âge de l'univers⁹.

La conservation de l'énergie

Au 19^e siècle, plus de cent cinquante ans après l'introduction du concept de force par Newton, la notion d'énergie est clarifiée. En 1842, Julius Robert Mayer, un médecin allemand, établit une corrélation entre chaleur et travail mécanique, comme deux

⁸ Newton, par sa théorie de la gravitation universelle, rend manifeste que les corps terrestres et célestes sont régis par les mêmes lois.

⁹ Christophe Salomon, *La mesure du Temps au 21^e siècle*, Séminaire Poincaré, Le Temps (2010) www.bourbaphy.fr/salomon.pdf.

formes de l'énergie. Il propose que l'énergie soit une quantité conservée. En 1843, James Prescott Joule, un brasseur anglais, observe l'augmentation de température produite par l'agitation mécanique de l'eau et en déduit une équivalence entre travail mécanique et chaleur. Il peaufine son expérience au cours des années suivantes. En 1847, Herman Ludwig von Helmholtz produit son fameux article « Sur la conservation de l'énergie ». En 1853, apparaît explicitement le concept d'énergie potentielle, même si l'idée se trouve déjà dans les écrits de Newton et de ses successeurs.

Le premier principe de la thermodynamique exprime, pour un système la loi de conservation de l'énergie :

$$\Delta U = Q + W$$

La variation d'énergie interne d'un système est égale à la chaleur et au travail qu'il échange avec le milieu extérieur.

L'énergie sous ses différentes formes est conservée. Par exemple, c'est la somme de l'énergie cinétique d'un système de particules chargées en mouvement et de l'énergie du champ électromagnétique qui les accompagne qui est conservée (théorème de Poynting, 1884).

Pour toute théorie qui peut s'exprimer sous forme lagrangienne ou hamiltonienne (mécanique classique et quantique, théorie des champs classiques et quantiques, etc.) apparaissent des lois de conservations (théorème de Noether, 1918 qualifié par Einstein de « monument de la pensée mathématique »). Ainsi l'invariance par translation dans le temps entraîne la conservation de l'énergie ; l'invariance par translation dans l'espace selon une direction donnée entraîne la conservation de la quantité de mouvement dans la même direction ; l'invariance par rotation dans l'espace entraîne la conservation du moment angulaire. Trois lois de conservation, trois grandeurs dimensionnelles fondamentales.

On voit ainsi comment sont intrinsèquement liés temps, longueur et énergie dans l'espace-temps de Minkowski et dans celui de Galilée.

Les lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment angulaire (dans sa formulation quantique) sont au cœur de la détermination de la masse et du spin de la plupart des particules élémentaires. Ainsi Pauli s'est appuyé sur ces lois pour proposer l'existence du neutrino à partir du spectre d'émission de l'électron dans la désintégration bêta du neutron :

neutron \rightarrow proton + électron + antineutrino

La découverte du boson de Brout-Englert-Higgs, H, annoncée le 4 juillet 2012, s'est appuyée sur l'hypothèse que ces mêmes lois de conservation sont valides, notamment dans la désintégration

H \rightarrow photon + photon

[Question : est-ce que l'énergie est conservée en relativité générale ? Si oui dans quel sens ?]

La physique est d'abord la science du mouvement

« La tendance historique de la physique est à la synthèse de phénomènes de plus en plus nombreux en un nombre de plus en plus restreint de théories. Ainsi on est parti, au début, de phénomènes aussi divers que le mouvement, la chaleur, le son, la lumière et la gravité. Puis est venu Newton qui a expliqué les lois du mouvement, et on a découvert que certaines de ces choses, apparemment si disparates, n'étaient en fait que divers aspects d'une seule et même chose, le mouvement. On s'aperçut que le son, par exemple, était entièrement explicable en termes de mouvements des atomes de l'air. Le son, de ce fait, cessa d'être considéré comme un phénomène différent du mouvement. On s'aperçut également que les phénomènes caloriques pouvaient facilement être interprétés à partir des lois du mouvement. De grands pans de la physique se sont trouvés ainsi synthétisés en une seule théorie simple. Cependant, la théorie de la gravitation s'est révélée irréductible aux seules lois du mouvement et, aujourd'hui encore, cette théorie reste une théorie à part. La gravitation, jusqu'à preuve du contraire, reste inexplicable en termes d'autres phénomènes.

Après qu'on eut effectué cette synthèse des phénomènes de mouvement, de son et de chaleur, furent découverts un certain nombre d'autres phénomènes : les phénomènes électriques et magnétiques. C'est alors qu'en 1873, James Clerk Maxwell réalisa une nouvelle synthèse unissant en une seule et même théorie les phénomènes électriques et magnétiques et les phénomènes lumineux. Selon Maxwell, la lumière n'est autre qu'une onde électromagnétique. Restaient donc en piste, à ce stade de l'évolution historique de la physique, les lois du mouvement, les lois de l'électricité et du magnétisme, et les lois de la gravité.

Aux alentours de 1900 fut élaborée une théorie de la matière, à laquelle on donna le nom de théorie électronique, selon laquelle les atomes renfermaient en leur sein de toutes petites particules chargées. Cette théorie fut peu à peu transformée pour tenir compte de la présence dans l'atome d'un noyau lourd autour duquel les électrons effectuaient des révolutions.

Toutes les tentatives en vue d'expliquer le mouvement des électrons autour du noyau à l'aide des lois de la mécanique (sur le modèle de ce qu'avait fait Newton pour les mouvements de la Terre autour du Soleil) s'avérèrent infructueuses. Incidemment, la théorie de la relativité, dont on dit couramment qu'elle révolutionna la physique, date d'à-peu-près la même époque. Mais au regard de ce que fut la découverte de l'inadéquation des lois de Newton au niveau atomique, la théorie de la relativité paraît n'avoir apporté que des changements bien modestes. L'élaboration d'un système théorique destiné à remplacer les lois de Newton fut longue et laborieuse, tant les phénomènes au niveau atomique sont étranges. La compréhension de ce qui se passe à ce niveau ne se fit qu'au prix de l'abandon des idées du sens commun. Et ce n'est qu'en 1926 que fut finalement élaborée une théorie, dénuée de sens commun, permettant d'expliquer le comportement peu ordinaire des électrons à l'intérieur de la matière. À cette théorie apparemment farfelue, mais apparemment seulement, fut donné le nom de théorie

quantique, d'après le mot "quantum", lequel traduit précisément cet aspect de la nature contraire au sens commun (...)

Cette théorie quantique, parce qu'elle permettait aussi d'expliquer des faits tels que, par exemple, la combinaison de deux atomes d'hydrogène avec un atome d'oxygène pour donner de l'eau, a fini par supplanter les théories qui, avant elle, fondaient la chimie. Du point de vue fondamental, la chimie théorique n'est en fait qu'une branche de la physique.

Parce qu'elle permettait d'expliquer la chimie, la théorie quantique connut immédiatement un succès énorme. Ce qui n'empêchait pas le problème de l'interaction matière-lumière de rester entier. De fait, c'est la théorie de Maxwell, théorie de l'électricité et du magnétisme, qui allait devoir subir des modifications destinées à la mettre en accord avec les principes de la nouvelle théorie quantique. Ainsi naquit, aux environs de 1929, une nouvelle théorie, la théorie quantique de l'interaction matière-lumière, à laquelle on a donné l'horrible nom d'électrodynamique quantique ». [Feynman 1985] voir aussi [Kerckhofs 2011].

La physique relativiste et quantique du 20^e siècle

$$x = c \cdot t \quad (1)$$

C'est l'équation qui lie longueur et temps pour la lumière.

$$- E = h \cdot \nu \quad (2) \quad (\text{Planck, 1899 — Einstein, 1905, Schrödinger, 1926})$$

$$- E(r) = m \cdot c^2 \quad \text{énergie de la particule au repos (Einstein, 1905)} \quad (3)$$

De (2) et (3), on déduit

$$- m = E/c^2 = h \cdot \nu / c^2 \quad (4)$$

En principe la masse m peut donc être déduite de la fréquence ν (inverse de la période T)

Dans sa thèse de doctorat¹¹ (1924), Louis de Broglie a écrit : On peut donc concevoir que par suite d'une grande loi de la Nature, à chaque morceau d'énergie de masse propre m soit lié un phénomène périodique de fréquence ν telle que l'on ait $h \cdot \nu = mc^2$. » Un article¹² paru dans *Science* le 1 février 2013 montre concrètement comment appliquer l'équation (4) pour relier la masse au temps (fréquence).

Les équations (1) et (4) expriment masse et longueur en fonction du temps

Atome d'hydrogène¹³ :

$$m(H) = m(p) + m(e) - \frac{1}{2} \alpha^2 \{m(p) \cdot m(e) / [m(p) + m(e)]\}$$

¹⁰ Notons que $h \cdot c \approx 197,327 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ avec $h = h/(2\pi)$ et fm pour fermi

¹¹ de Broglie, Louis. *Recherches sur la théorie des Quanta*. Thèse de doctorat (25 novembre 1924), Université de Paris, <http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/ar...I-00006807.pdf>.

¹² « A Clock Directly Linking Time to a Particle's Mass », *Science* 1 February 2013: Vol. 339 no. 6119 pp. 554-557 <http://www.sciencemag.org/content/339/6119/532.full>

¹³ Les masses du proton et de l'électron renvoient à la grandeur **dimensionnelle** fondamentale qu'est la masse. α est au contraire un paramètre sans dimension, le couplage de l'interaction électromagnétique.

Voir aussi le [L2013-02-25LN3grandeurs-annexe.pdf](http://www.sciencemag.org/content/339/6119/532.full) en annexe.

émission de lumière entre le niveau d'énergie n et le fondamental ($n = 1$) dans l'atome d'hydrogène :

$$h \nu = \frac{1}{2} \alpha^2 c^2 \left\{ \frac{m(p) \cdot m(e)}{m(p) + m(e)} \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{n^2} \right\}$$

avec α = constante électromagnétique de structure fine
 $\alpha = 1/(137.035\ 999\ 1)$

On voit ici la relation entre masse et temps (fréquence).

Les unités fondamentales de la physique.

De ce qui a été écrit ci-dessous, il apparaît qu'il y a trois unités dimensionnelles fondamentales : la seconde, le mètre et le kilogramme.

« An approach different from the above underlies the International System of Units (Système International d'Unités).

This System includes 7 basic units (metre, second, kilogram, ampere, kelvin, mole, candela) and 17 derivative ones. The SI might be useful from the point of view of technology and metrology, but from the point of view of pure physics four out of its seven basic units are evidently derivative ones.

– Electric current is number of moving electrons per second.
– Temperature, T , up to a conversion factor (Boltzman constant : $k = 1.38 \times 10^{-23}$ joules/kelvin), is the average energy¹⁴ of an ensemble of particles.

– Mole is trivially connected with the number of molecules in one gram-molecule, called Avogadro's number $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ /mole.

– As for unit of optical brightness or illumination (candela), it is obviously expressed in terms of the flux of photons.

It is interesting to compare the character of k with that of c , h (...). The Boltzman constant is an important conversion factor which signals the transition from a few (or one) particle systems to many particle systems. However it radically differs from c , h , (...) as there is no physical quantity with the dimension of k , for which k is a critical value.(...)

The above arguments imply what is often dubbed as a "moderate reductionism", which in this case means that all physical phenomena can be explained in terms of a few fundamental interactions of fundamental particles and thus expressed in terms of three basic units and a certain number of fundamental dimensionless parameters.

The role of conversion factor is only a secondary one for c , h (...), whereas for k it is the only one. » [Okun 2002]

¹⁴ Si ϵ est l'énergie moyenne d'une molécule d'un gaz parfait monoatomique, alors $\epsilon = 3/2$ kT

En 1967 est introduite la nouvelle définition de la seconde comme *la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133*¹⁵.

En 1971, la môle est définie comme la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.

En 1979, le candela est redéfini comme *l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian*.

En 1983, le mètre est redéfini, en fixant $c = 299\,792\,458$ m/s à partir de la définition de la seconde. La vitesse de la lumière c est définie comme un nombre sans indétermination. Un mètre est donc la distance parcourue par la lumière dans le vide en $(1/299\,792\,458)$ seconde.

En 1999, réflexion à la Conférence générale des Poids et Mesures en vue d'une nouvelle définition de l'unité de masse à l'aide de constantes fondamentales. Il reste donc aujourd'hui un seul étalon de mesure macroscopique, le kilogramme qui se trouve à Sèvres (France). Il est espéré que dans un futur rapproché (voir référence 12), la qualité des mesures de la masse permettront que les unités fondamentales de la nature s'expriment en termes de c et h . Ainsi les unités fondamentales du Système international (SI) de métrologie s'exprimeront sans recours à un étalon macroscopique [Okun 2002 et 2003].

L'origine de la masse – QCD et théorie électrofaible

« La Mécanique newtonienne pose la masse comme une caractéristique première de la matière, incapable de plus amples éclaircissements¹⁶.

Maintenant, nous considérons la masse newtonienne comme une propriété émergente¹⁷. [...] Newton comme Maxwell, au contraire, considéraient que les éléments de base de la matière ont été fabriqués par Dieu au moment de la création. La théorie quantique des champs contemporaine ouvre la possibilité d'une autre explication. [...] Plutôt que d'avoir à traiter à part la masse de chaque objet dans l'univers, nous pouvons nous concentrer sur les propriétés de quelques champs quantiques, dont les excitations (quanta) sont les éléments constitutifs de la matière. Ainsi par exemple, si nous comprenions les propriétés (y compris la masse) d'un électron, nous pourrions comprendre les propriétés de tous les électrons. Plus généralement : si nous comprenions les propriétés des champs associés aux éléments constitutifs de la matière, nous devrions être en mesure de déduire les propriétés — y compris de masse ! — de la matière même, et ces déductions seront valables universellement. » [Wilczek, 2012]

- [« Newtonian mechanics posited mass as a primary quality of matter, incapable of further elucidation. We now see Newtonian mass as an emergent property. [...] Both Newton and Maxwell inferred that the basic building blocks

¹⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Conf%C3%A9rence_g%C3%A9n%C3%A9rale_des_poids_et_mesures.

¹⁶ C'est d'ailleurs également le cas pour la mécanique quantique.

¹⁷ Ainsi la température est une propriété émergente de l'énergie apte à rendre compte d'une propriété essentielle de systèmes macroscopiques, comme le corps humain.

of matter were manufactured by God at the time of creation. Modern quantum field theory opens the possibility of an alternative explanation. [...] Rather than having to address the mass of each object in the universe separately, we can focus on the properties of a few quantum fields, whose excitations (quanta) are the building blocks of matter. Thus for instance if we understand the properties (including mass) of one electron we understand the properties of all electrons. More generally : If we understand the properties of the fields associated with the building blocks of matter, we should be able to deduce the properties — including mass ! — of matter itself, and those deductions will be valid universally. » [Wilczek, 2012]

**

« C'est (...) avec la masse que nos idées préconçues se trouvent peut-être les plus bousculées. Quoi de plus tangible que la masse ? N'est-ce pas a priori une propriété fondamentale d'un objet indépendante des circonstances ? Avec Lavoisier¹⁸, la masse est une propriété indestructible, que l'on retrouve à travers tous les processus chimiques. Avec Einstein, c'est une forme de l'énergie, mais dans la plupart des cas, la conservation de l'énergie entraîne la conservation de la masse. En physique des particules, la masse est une propriété intrinsèque de la particule, un invariant qui sert à la définir. La masse est longtemps apparue comme une propriété fondamentale.

N'est-il pas surprenant de la voir maintenant apparaître comme une propriété purement dynamique, liée aux propriétés du vide et à la façon dont elles affectent les particules qui s'y trouvent ? Le modèle standard introduit des particules sans masse et le couplage au champ de Higgs attribue une masse déterminée à chaque particule, toutes ces masses étant proportionnelles à la valeur moyenne de ce champ. On peut dire que la masse de chaque particule est maintenant donnée par une constante de couplage au champ de Higgs, soit autant de paramètres (de nombres purs) qu'il y a de particules.

Cela s'applique aux leptons, mais pour les quarks constituant des hadrons, il faut aller plus loin. Les quarks u et d ne vont acquérir ainsi que des masses très faibles (quelques MeV) par rapport à celles des protons et des neutrons qu'ils constituent (de l'ordre du GeV). Or la masse du proton et celle du neutron représentent la masse telle qu'elle apparaît dans la vie courante, la masse des atomes et donc de tous les corps. (...) Cette masse hadronique correspond à la masse effective que prennent ces quarks quand ils s'habillent de gluons à l'intérieur d'un hadron. Pratiquement, la totalité de cette masse effective est un effet dynamique. On peut aussi dire qu'elle correspond à l'énergie nécessaire pour créer la bulle que va constituer la particule dans un vide qui préférerait ne pas l'avoir et ne la tolère que parce qu'elle est globalement "neutre" vis-à-vis de la couleur. La création de cette "bulle" demande une énergie de l'ordre du GeV. D'où vient cette valeur de la masse ? Il n'y a pas d'échelle de masse en chromodynamique. Il n'y a qu'une constante de couplage sans dimension. Nous avons vu qu'une échelle de masse (de l'ordre de 150 MeV) apparaît pourtant quand on considère la variation de la constante de couplage effective avec le transfert. Elle est incontournable lorsqu'on veut calculer et pour ce faire renormaliser la théorie.

¹⁸ La conservation de la masse est la loi zéro de Newton, comme la nomme Wilczek.

(...) La masse va dépendre de la structure de la chromodynamique fondée sur la symétrie SU(3) de la couleur. Elle dépend avant tout du fait qu'il y a 8 gluons et 2 quarks à ce niveau d'énergie, encore une fois des nombres purs. Mais il n'y a pas que cela. Un physicien dira que lorsqu'on renormalise une théorie il faut se raccrocher à une valeur expérimentale qu'on ne peut que mesurer et qui, dans le cas de l'interaction forte, peut être choisie comme une distance de l'ordre de 1 fermi (où mesurer la force de l'interaction avec un couplage effectif de l'ordre de 1) ou une énergie de l'ordre de 150 MeV (donnant la variation du couplage effectif avec le transfert). On se raccroche souvent en pratique à la masse du méson rho qui vaut 750 MeV. L'expérience a bien son mot à dire. On ne saurait cependant minimiser la portée de la théorie. Fixant l'échelle de masse sur la valeur d'une masse hadronique, on peut en principe calculer toutes les autres masses. (...) Ce n'est aujourd'hui possible qu'au prix de gros calculs numériques sur des ordinateurs qui deviennent de plus en plus puissants (...).

Cette nouvelle conception de la masse est une révolution importante. Ce qui apparaissait comme une propriété intrinsèque et immuable se voit relégué au rang d'effet dynamique dépendant des interactions et, avant tout, de la structure du vide » [Jacob 2001]. Voir aussi [Strassler, 2012]

Pour conclure

Temps, longueur et masse-énergie sont les trois grandeurs dimensionnelles fondamentales qui permettent de comprendre la nature. Elles sont apparues, au cours de l'histoire de plus en plus intrinsèquement liées. À ces trois grandeurs fondamentales correspondent trois lois de conservation : énergie, quantité de mouvement, moment angulaire.

« Qu'est-ce que l'espace ? Une scène vide, devant laquelle se passe le drame du monde physique de la matière ? Un participant à part égal qui apporte à la fois la toile de fond et a une vie qui lui est propre ? Ou la réalité première, dont la matière est une manifestation seconde ? Les opinions sur cette question ont évolué, et ont plusieurs fois tout au long de l'histoire des sciences. Aujourd'hui, le troisième point de vue est triomphant. »

[« What is space? An empty stage, where the physical world of matter acts out its drama? An equal participant, that both provides background and has a life of its own? Or the primary reality, of which matter is a secondary manifestation? Views on this question have evolved, and several times changed radically, over the history of science. Today, the third view is triumphant »]. [Wilczek 2008]

Références

[Adler 2002] Ken Adler, *Mesurer le monde. L'incroyable histoire de l'invention du mètre*, Champs histoire, 2008 – *The Measure of All Things. The seven-year odyssey and hidden error that transformed the world*, The Free Press, 2002.

[Engels 1877] Friedrich Engels, *Karl Marx*, <http://www.marxists.org/francais/engels/works/1877/06/fe18770600.htm>, 1877.

[Feynman 1985] *Lumière et matière : une étrange histoire*, InterEditions, 1987 – *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, 1985 <http://studies.d-meeus.be/wikindx3/index.php?action=resourceView&id=1132>.

[Galison 2003] Peter Galison, *L'empire du temps. Les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré*, Gallimard, 2006. — *Einstein's clocks, Poincaré's maps : empires of time*, W.W.Norton, 2003.

[Goudsmit 1966] Samuel A. Goudsmit et Robert Clairborne, *La mesure du temps*, Robert Laffont, 1970 – *Time*, Time-Life Library, 1966.

[Jacob 2001] *Au cœur de la matière : La physique des particules élémentaires*, Sciences, Éditions Odile Jacob, 2001. <http://studies.d-meeus.be/wikindx3/index.php?action=resourceView&id=994>

[Kerckhofs 2011] J-P. Kerckhofs et J.Pestieau, La matière illuminée, *Études marxistes* n°97, 2011, http://www.marx.be/fr/content/%C3%A9tudes-marxistes?action=get_doc&id=95&doc_id=734.

[Okun 2002] L.B. Okun, *Fundamental constants: parameters and units*, arXiv :physics/0110063v3 [physic.class-ph], 2002 — jhep03 (2002) 023.

[Okun 2003] L.B.Okun, *Fundamental units : physics and metrology*, arXiv:physics/0310069v1 [physics.ed-ph], 2003.

[Singh 2005] Simon Singh, *Le roman du Big Bang*, Hachette, 2005 – *Big Bang*, Fourth Estate, 2004; Harper Perennial, 2005.

[Speiser 1988] David Speiser, « Le Horologium Oscillatorium de Huygens et les Principia », *Revue philosophique de Louvain* 86, novembre 1988, pp. 485-504 — *Discovering the Principles of Mechanics 1600-1800*, Birkhäuser, 2008

[Strassler 2012]. Matthew J. Strassler, *Pourquoi la particule de Higgs est importante*, *Études marxistes*, n°99, 2012, http://www.marx.be/fr/content/%C3%A9tudes-marxistes?action=get_doc&id=97&doc_id=754 — *Why the Higgs Particle matters*, 4 July 2012, <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/why-the-higgs-particle-matters/>.

[Wilczek 2008] Frank Wilczek, *The Lightness of Being*, Basic Books, 2008; Penguin Books 2010 ; http://www.lightnessofbeingbook.com/inside_Chapter1.html.

[Wilzeck 2012] Frank Wilczek, *Origin of Mass*, <http://arxiv.org/pdf/1206.7114v2.pdf>, 2012.