Contingence et nécessités des unités de mesure

Patrice Delon

▶ **To cite this version:**

Patrice Delon. Contingence et nécessités des unités de mesure. 2021, 9798716814387. ⟨hal-03213800⟩

HAL Id: hal-03213800

https://hal.science/hal-03213800v1

Submitted on 30 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HAL Authorization

Contingence et nécessités des unités de mesure

Patrice DELON

Paris 7 Sphère

« Outre le défi que pose à la science le vécu de témoignages à la fois incroyables et irrécusables, il y a le défi de la science à la philosophie : celui de la disjonction du pensable et du possible. La science nous place en effet devant des hypothèses à ce point contre-intuitives que ce qu'elle présente comme une réalité au moins possible est proprement impensable. Le défi pour la philosophie serait alors d'apprivoiser pour le sens commun ces vérités contre-intuitives de la physique contemporaine. Faute de volontaires dans les rangs des philosophes, des physiciens se dévouent. »

Ferry J. M., 2020, Qu'est-ce que le réel ? Revue Études, n° 4269, p. 65

Table des matières

TABLE DES MATIERES **4**

TABLE DES ILLUSTRATIONS **5**

INTRODUCTION **5**

UNITES DE MESURE ET DIMENSIONS DANS LES SCIENCES PHYSIQUES **11**

LES UNITES DE MESURE 11
LE CONCEPT DE DIMENSION EN PHYSIQUE 14
L'ACTE DE MESURE EN PHYSIQUE 20

ÉVOLUTION DES UNITES DE MESURE DEPUIS SA CREATION **23**

CHOIX DU PREMIER SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITES DE MESURE 24
ÉVOLUTION DES TROIS UNITES PRIMAIRES 28
LE CHOIX DE LA CONSTANTE FONDAMENTALE REFERENCE DU KILOGRAMME 62
SYSTEMES D'UNITES NATURELLES 88
CONCLUSION PROVISOIRE 98

QUESTIONS OUVERTES DANS LES NOUVELLES DEFINITIONS DU SI **100**

LE PARADIGME DES THEORIES PHYSIQUES 100
LIEN ENTRE MODELE MATHEMATIQUE, UNITES DE MESURE ET NATURE DES CONSTANTES FONDAMENTALES 102
SUR L'EXISTENCE D'UNE LOI ULTIME DECRIVANT TOUS LES PHENOMENES DE L'UNIVERS ET SUPPRIMANT TOUTES CONSTANTES FONDAMENTALES 105
SUR LE CHOIX DES CONSTANTES ATTACHEES A CHAQUE UNITE 111
SUR LA DEFINITION DE LA SECONDE 120
SUR LA DEFINITION DU METRE 122
SUR LA DEFINITION DE L'AMPERE 123
SUR LA DIFFERENCE DE NATURE DES UNITES DE TEMPS ET DE LONGUEUR 124
SUR LA DEFINITION DU KILOGRAMME 127
SUR LA DIFFERENCE ENTRE UN ACTE DE MESURE D'OBJETS QUANTIQUE ET CLASSIQUE 142
NOTRE DESCRIPTION DE LA REALITE EST-ELLE ANTHROPOCENTRIQUE ? 144
CONTINGENCE DE L'INTERPRETATION PHYSIQUE D'UN PHENOMENE ET SON IMPLICATION SUR LA DEFINITION DES UNITES DE MESURE 146

CONCLUSION GENERALE **149**

BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES **152**

BIBLIOGRAPHIES PRIMAIRE : 152
BIBLIOGRAPHIE SECONDAIRE : 155
REFERENCES CITEES 158

Table des illustrations

Figure 1 : L'horloge marine n°4 de Harrison 36
Figure 2 : Extrait de la carte realisee par Delambre pour la mesure du meridien terrestre 42
Figure 3 : Schema de la balance du voltage absolu (extrait de l'article de R. Steiner) 75
Figure 4 : Schema de l'electrometre modifie 76
Figure 5 : Principe de la balance de l'Ampere 78
Figure 6 : Schema de principe de la balance du Watt actuelle definie par Kibble 79
Figure 7 : La balance du Watt du BIPM en 2017 pendant une phase de maintenance 80
Figure 8 : Principe fonctionnel d'une jonction Josephson 83
Figure 9 : Schema de principe d'une cellule a effet Hall quantique 84
Figure 10 : Les differentes particules elementaires selon le modele standard 129

Introduction

Aussi loin que l'on puisse remonter dans l'histoire des civilisations humaines, l'homme a toujours utilisé des unités de mesure, des références permettant à la fois la reproduction de différents objets, et d'autre part permettre l'échange entre les humains, l'établissement des bases du commerce.

Pourquoi ce besoin d'établir un système de références commun à un grand nombre de personnes et permettant des comparaisons entre des objets de mêmes natures, pourquoi chercher à quantifier des objets et plus généralement tout ce qui nous entoure et constitue notre environnement, notre quotidien ? Une première réponse est intuitive : l'homme a besoin pour vivre de collaborer avec d'autres êtres de son espèce, d'échanger avec eux de façon à lui faciliter son quotidien en répartissant les différentes tâches nécessaires entre plusieurs personnes d'une même communauté. Est-ce l'unique moyen pour arriver à cette fin, à cette collaboration constructive, dont l'un des objectifs est la perpétuation de l'espèce et son développement ? Aurait-il été possible d'arriver au même but par un autre moyen ? La question est intéressante mais n'a pas de solution évidente. Si nous tentons de repenser nos civilisations passées et actuelles sans le concept d'unités de mesure, nous arrivons à une impossibilité pratique : l'homme a le besoin impérieux de mesurer ce qui l'entoure, les objets de son quotidien comme ceux qui lui sont inaccessibles, par exemple ceux relevant du domaine astronomique. De ce

point de vue, les unités de mesure nous semblent une nécessité, bien que leurs définitions relèvent, elles, d'un acte purement contingent.

Pourquoi cette apparente nécessité des unités de mesure ? À cause de notre relation au monde, à la réalité dans laquelle nous sommes plongés, notre Univers. Nous ne sommes reliés à notre environnement que par l'intermédiaire de notre perception sensorielle. Ce n'est qu'au travers de ces sens que nous pouvons construire nos schémas de représentation mentale du monde dans lequel nous devons évolués, vivre et nous reproduire et interagir avec d'autres êtres vivants. Que peuvent donc représenter ces unités de mesure vis-à-vis de ce système de perception ?

Une unité de mesure constitue une référence comparativement à d'autres objets d'une même nature ou d'une nature comparable. Une unité de mesure est toujours attachée à une grandeur particulière. À chaque grandeur doit être attachée une unité de mesure particulière. Une quantité de matière, par exemple, peut se définir soit à l'aide d'un volume soit par sa masse. Mais dans chacun de ces deux cas, la description de l'objet considéré reste incomplète, insuffisante. Un volume doit être défini en termes de ses dimensions spatiales, de sa forme géométrique, et sa masse, reliée au volume, va nous indiquer une précision, sa densité.

Quel lien peut-on établir entre la largeur d'un récipient et son volume ? Ces deux grandeurs sont-elles fondamentalement différentes ou bien l'une peut-elle être dérivée de l'autre. Là encore c'est notre système de perception et le choix contingent des unités de mesure qui va nous procurer la réponse : nous savons qu'un volume peut se déterminer à partir de ses différentes dimensions spatiales, telles que notamment sa largeur, sa hauteur, sa profondeur. Ainsi volume et distance entre deux points, bien qu'intuitivement correspondant à des concepts différents, peuvent être considérés comme relatifs à une même grandeur, celle des distances entre deux points de l'espace. Même si l'on peut aisément convenir de façon conventionnelle de deux unités distinctes, l'une de distance et l'autre de volume, ces deux unités ne seront pas fondamentalement distinctes ; l'unité de volume sera une unité que nous pourrons qualifier de dérivée par rapport à celle des distances. À l'unité de distance est associée à un concept physique différent, celui de dimension.

Se pose alors la question du nombre nécessaire d'unités afin que toutes les opérations de mesure souhaitées par les hommes puissent trouver une réponse satisfaisante. Il est possible, et l'histoire nous le rappelle, de définir plusieurs unités différentes pour réaliser la mesure d'une même grandeur, par exemple celle des distances [1] entre deux points. Mais existe-t-il un minimum d'unités que nous pourrons ainsi qualifier à la fois de suffisantes et de nécessaires ? Cette question, comme nous le verrons dans cette étude, reste en partie ouverte. La réponse est-elle liée au nombre minimum nécessaire de dimensions ? Si nous voulons tenter d'apporter une réponse à cette question nous devons poser préalablement la question du nombre nécessaires de dimensions pour mesurer l'Univers, pour le décrire et le comprendre. Ces réponses correspondent à la question « comment », la seule qui est accepté par les physiciens, celle du « pourquoi » relevant d'une métaphysique.

Il semble évident que le caractère limité de notre perception sensorielle va conduire les hommes de science, les physiciens notamment, vers une définition imparfaite, incomplète, des unités de mesures. En ce sens il nous est possible de reconnaitre un caractère contingent de tous les systèmes d'unités élaborés.

« *Notre connaissance par la mesure peut être limitée soit par notre aptitude théorique à définir des concepts adaptés à la réalité du monde, soit par nos possibilités techniques pour observer ce monde réel. Dans le premier cas nous, nous savons définir un mode opératoire précis, mais nous ignorons à quoi correspond au juste ce que nous obtenons, parce que le concept de grandeur a été mal défini, ou bien parce que nous sommes trop éloignés des*

[1] Adler K. et Devillers-Argouarc'h M., 2005, Mesurer le monde. L'incroyable histoire de l'invention du mètre, 1792-1799, essais Flammarion, introduction

conditions normales de sa définition, ou encore parce que l'interaction destinée à le mettre en évidence est non reproductible ou même complétement isolée. Dans le second cas, le concept est clair, mais nos moyens instrumentaux pour l'atteindre sont insuffisants. Le plus souvent, ces limites sont purement techniques, donc provisoires. Ce sont celles que nous avons rencontrées pour caractériser les qualités de la mesure (finesse, justesse, fidélité, étendue de mesure, …), ou encore celles imposées par l'échantillonnage : en effet le nombre de points de mesure est forcément limité, ne serait-ce que parce que le mesurage est souvent couteux et qu'il conduit parfois à la destruction de l'objet. Mais il existe des limites plus fondamentales, fixées par les constantes de la physique ; heureusement, on peut généralement les ignorer, car elles ne se rencontrent qu'au niveau cosmique. »[2]

Les sciences physiques n'ont pas toujours cherché à quantifier les observations faites et à les modéliser par l'utilisation de théories mathématiques appropriées. Dans l'antiquité, les sciences physiques, et notamment l'astronomie qui en constituait la majeure partie, étaient en partie descriptives ; elles se contentaient de décrire certains phénomènes qui était observé et de les comprendre à l'aulne des connaissances de l'époque, connaissances scientifiques mais aussi théologiques. C'est ainsi que l'on observa que l'année solaire comportait un peu plus de 365 jours, quantité que les égyptiens avaient empiriquement observée. Ces observations et les connaissances qui en résultaient répondaient à un double besoin de croyance et d'utilisation pratique dans l'organisation des sociétés naissantes. Ce n'est que progressivement, et surtout à partir du 16ème siècle que les savants vont chercher à modéliser, de façon systématique, leurs observations sous forme de théories utilisant le langage mathématique. Galilée est l'un des premiers qui cherchant à comprendre les résultats de ses observations va tenter de les quantifier de façon à prouver leurs réalités et faciliter leurs compréhensions. L'outil mathématique que les scientifiques vont utiliser majoritairement jusqu'à la fin du 18ème siècle reposait sur la géométrie. Ce n'est que progressivement que les théories algébriques, utilisées notamment par Leibniz et d'autres, vont remplacer la géométrie dans la description des théories physiques. Les raisons de l'abandon de la géométrie comme unique outil mathématique sont nombreuses. Construire un modèle de représentation fondé sur des rapports ne permet pas d'accéder directement à la mesure d'une grandeur et nécessite une représentation mentale sous forme géométrique de tous les phénomènes que l'on cherche à expliquer ou dont l'on voudrait prédire la reproductibilité dans des circonstances différentes, ce qui présente une réelle difficulté.

Est-ce à dire qu'il n'existait pas d'unités de mesure avant le 16ème siècle, non bien sûr, mais Bien avant l'usage systématique des mathématiques pour modéliser les théories physiques, dès l'antiquité, les unités de mesure avaient été introduites afin de simplifier la vie au quotidien en permettant les échanges de savoir et de denrées de tous types. Tant que l'on se cantonnait à l'utilisation de rapport de grandeur, comme le fit Newton dans les Principia, point n'était besoin de la définition d'un unique système d'unités de mesure dans le domaine des sciences, le rôle de celles-ci étant principalement dédiées à l'usage des activités humaines comme le commerce, la construction et l'arpentage, notamment. Relevant strictement du domaine des activités humaines, ces anciennes unités étaient construites sur des références anthropocentriques : par exemple, les dimensions et proportions d'une construction pouvaient se référer à des unités de mesure de longueur comme le pied de roi de Calais, le pied de Paris ou la coudée. Si ces premières unités de mesure étaient largement utilisées dans les échanges commerciaux, elles conduisaient dans la physique naissante à d'importantes difficultés de compréhension entre scientifiques la précision étant médiocre. En revanche il existait des unités pour chacune des taches du quotidien : unités de longueur, de volume, de temps, de poids et de monnaie principalement.

[2] Perdijon J., 1998, La Mesure science et philosophie, Dominos Flammarion, p 75

Ces unités de mesure reposaient sur des références incontestables et que le peuple pouvait accepter : les grecs utilisaient par exemple le pied d'Héraclès qui si l'on se réfère à la mesure d'un stade de cette époque correspondant à 800 pieds conduit à attribuer à ce demi Dieu une pointure équivalente à du 46. Ce choix d'une référence anthropocentrique des unités de mesure était guidé par deux raisons principales :

Honorer les Dieux à apparence humaine ou un personnage politiquement important,

Choisir une unité dont la valeur était la plus adaptée à un usage quotidien.

Choisir un volume de liquide correspondant à celui d'une cruche simplifiait considérablement les gestes de la vie courante, le choisir trop grand ou trop petit aurait entraîné son rejet par la population qui l'aurait considéré comme mal commode, inutile. Mais en même temps toutes ces unités se référaient toujours aux modes de perception de l'humain. Ce n'est pas sans raison que les premières unités, bien que parfois innombrables, concernaient uniquement les masses, les longueurs et les durées. Ces trois grandeurs suffisaient, et suffisent encore à définir tout ce qui est perçu par nous dans l'Univers dans lequel nous évoluons. C'est pour cette raison que ces trois unités sont qualifiées de primaires. Il est impossible de séparer ces unités des informations reçues par les cinq sens principaux dont les humains sont dotés et qui sont le résultat de l'évolution terrestre de l'espèce humaine. Tous les choix d'unités faits depuis l'antiquité, jusqu'au 19ème siècle, sont contingents de ces modes de perception de l'humain ; si ceux-ci avaient été différents, il est probable que les systèmes d'unités utilisés depuis l'antiquité, ainsi que le système actuel, auraient été fort différents.

Cette référence purement anthropocentrique, résultant d'une démarche conventionnelle, va perdurer jusqu'à la révolution française où les scientifiques et les acteurs du monde économique et industriel vont chercher des références plus stables, plus facilement contrôlables et surtout plus acceptables par les différents acteurs de la société. La multiplication des unités de mesure sur un même territoire était un frein important au commerce et à l'industrie naissante. Les scientifiques vont alors réaffirmer leur choix de se rapprocher des lois de la nature et des grandeurs qui apparaissaient comme les plus fondamentales, celles qui semblaient constantes indépendantes du temps, du moins sur des périodes de temps suffisamment longues à l'échelle humaine. Se détachant de la référence à l'humain, l'on va chercher à définir une référence correspondant à un absolu. Mais tout en recherchant ces références aux lois naturelles les plus fondamentales, invariantes temporellement et spatialement, on va continuer à choisir comme unités des grandeurs qui sont non seulement accessibles à nos sens mais qui en sont la finalité. C'est ainsi que l'on ne va pas remettre en cause la nature des unités choisies depuis l'antiquité ; pas question d'abandonner l'unité de longueur, de temps ou de masse ; mais par contre l'histoire, les progrès des connaissances en physique, vont conduire progressivement à de nouvelles unités dont l'objet principal sera de faciliter l'exercice de certaines nouvelles professions comme la chimie ou l'optique.

Mais pour permettre un développement technique des sociétés civiles, ces unités vont requérir de plus en plus de précisions dans leurs définitions, une plus grande stabilité des définitions, un meilleur contrôle de la diffusion de ces unités de mesure dans les différentes régions, ce qui va conduire les hommes à rechercher des références à la fois stables mais également accessibles à une mesure de plus en plus précise. Unités et développements économiques et scientifiques ont toujours été intimement liés.

Les scientifiques se sont alors tournés vers ce monde dans lequel ils vivaient afin de trouver des objets, des grandeurs physiques, qui remplissaient les conditions requises pour servir de base à la définition des unités. Ce fut des définitions d'unités de mesures utilisant les technologies disponibles, des grandeurs astronomiques et maintenant des objets physiques particuliers, les constantes fondamentales de la physique. À chaque époque de l'histoire correspond des moyens appropriés pour définir ces unités nécessaires à la vie sociale et économique. Le rôle des unités a toujours été très important dans les sociétés humaines. Cette

importance se retrouve dans l'intérêt à la fois scientifique et philosophique manifesté à leurs égards.

Autour des années 1950, devant la complexité et le renouveau du paradigme physique centré sur les deux théories majeures que sont la mécanique relativiste et la mécanique quantique, les scientifiques ont estimé que les philosophes ne leurs apportaient plus l'aide nécessaire, celle qui leurs permettrait de comprendre le sens des nouveaux concepts émergeant avec ces deux théories. Bachelard, par exemple, observa se divorce latent entre philosophes et physiciens.

« *Le philosophe qui médite sur les problèmes actuels de la pensée scientifique est à la croisée des chemins : […] laissera-t-il se consommer le divorce déjà accepté, parfois désiré, par certains philosophes et certains savants ?* »[3]

Mais les scientifiques de leur côté vont tenter de s'affranchir des études philosophiques, accusant les philosophes de ne pas comprendre ce que faisaient les physiciens.

« *La philosophie est morte, faute d'avoir réussi à suivre les développements de la science moderne, en particulier de la physique. Ce sont les scientifiques qui ont repris le flambeau dans notre quête du savoir.* »[4]

Le cas de l'unité de masse est, sur ces aspects, symptomatique : la définition de cette unité a peu évolué depuis sa normalisation lors de la période de la révolution française. Le monde industriel n'exprimait pas de besoins particuliers d'un accroissement de la précision pour cette grandeur. Mais au 20ème siècle, devant la nécessité d'accroitre sa précision de définition, motivée par une demande industrielle dans les domaines de la chimie, de la mécanique puis dans celui de l'électronique, un saut de définition a été nécessaire afin de répondre à l'attente des milieux économiques et scientifiques. Le choix qui a été fait devait répondre également à un souci d'harmonisation de toutes les définitions des unités de mesure, souci dont l'origine peut être trouvée dans le désir d'unifier toutes les théories physiques, de les fondre en une unique théorie. La normalisation réalisée dans tous les domaines économiques afin de favoriser la mondialisation du commerce mais aussi des pensées et modes de vie rendait elle aussi prégnante l'harmonisation des définitions des unités : un seul type de définition pour toutes les unités utilisées.

L'évolution de la définition de l'unité de masse est intéressante car elle reflète bien les interactions entre l'évolution de la société tant du point de vue technologique qu'économique et les progrès réalisés dans les théories fondamentales de la physique, notamment en physique quantique.

Ce choix s'est porté, après bien des débats, sur les constantes fondamentales bien que ces objets physiques soient l'objet d'importantes controverses et présentent de nombreuses questions ouvertes ; la nature et le statut même de constante fondamentale ne semblent pas interprétés de la même façon par tous les scientifiques, ce qui conduit à de nombreux débats sur le statut de telle ou telle constante.

Cet intérêt pour ces constantes fondamentales va pousser certains scientifiques, notamment ceux proches des théories fondamentales, à approfondir le concept de constantes physique et à tenter d'en déduire une construction théorique, et d'un système naturel de mesure se libérant de toute contrainte observationnelle. Cette tentative a des conséquences sur le paradigme physique actuel, constitué par les deux théories fondamentales, pour lesquelles de nombreux physiciens ne reconnaissent qu'une unique interprétation qualifiée de standard. Les échelles de mesure obtenues en utilisant ces systèmes d'unités naturels vont être utilisées dans le cadre de théories fondamentales émergentes ou pour justifier certaines interprétations physiques, par exemple certains phénomènes de la mécanique quantique.

---

[3] Bachelard G., 1951, *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, p. 1.

[4] Hawking S. et Mlodinow L., *Y a-t-il un grand architecte dans l'Univers ?*, Traduit de l'anglais par Marcel Filoche, Paris, Odile Jacob, 2011, p. 11

Une théorie physique, pour recevoir un consensus de la communauté scientifique, doit être fondée d'une part sur des observations résultant d'une collection de phénomènes, soit existant directement dans la nature, soit résultant de dispositifs spécialement construits à cet effet et quantifiés à l'aide d'un système d'unités de mesure, et d'autre part sur un modèle mathématique adapté fournissant un modèle explicatif et prédictif performant.

L'un des fondements nécessaires à l'élaboration et la vérification permanente de toute théorie physique est l'existence d'un système d'unité de mesure reconnu par le plus grand nombre, qui doit d'abord trouver sa justification dans l'organisation de la société. Ainsi, faire de la physique suppose la définition préalable d'un système d'unités de mesure qui vont-elles-mêmes s'appuyer sur ces théories physiques ; nous sommes en présence d'un raisonnement circulaire qui montre l'indissociabilité du choix et de la définition des unités et de l'énoncé des théories physiques.

Il est donc vain de vouloir discuter d'unités de mesure sans parler de théories physiques. Une étude des unités de mesure et de leurs définitions doit s'appuyer en permanence sur les concepts fondamentaux des théories physiques utilisées pour l'énoncé de leurs définitions. Nous sommes dans un domaine, peut être le seul, où physique et philosophie se mêlent intimement. Comment par exemple parler de la définition de l'unité de masse sans rappeler ce que sont les concepts de masse, pesante ou inertielle, et aborder la question de la nature de la constante de Planck h.

L'objectif de cet essai est de comprendre la nature du système d'unité actuellement utilisé, que les métrologues appellent le système international (SI), la raison de sa nécessité et la part de contingence et de nécessité dans tout système d'unités. C'est ainsi que nous soutenons dans cette étude que :

Un système d'unités de mesure est nécessairement contingent car résultant des observations faites à partir d'une technologie existante à un instant donné et d'un choix conventionnel fondé sur nos sensations, la perception par nos sens,

Un système d'unités est également nécessaire car nous ne savons pas faire de physique sans disposer d'un système d'unités de mesure nous autorisant la conception d'un modèle mathématique prédictif et vérificatif pouvant conduire à une falsification des hypothèses choisies a priori,

Les trois unités fondamentales, le mètre, la seconde et le kilogramme, bien que conventionnelles, portent en elles une part de nécessité qui va se trouver renforcée par le choix d'une définition fondée sur le groupe restreint des constantes universelles,

Dans l'état actuel de notre compréhension du monde, à l'aide des deux théories fondamentales que sont la mécanique relativiste et la mécanique quantique, le nombre des constantes universelles peut se limiter à trois : la constante de Planck h, la vitesse de la lumière dans le vide c et la charge électrique unitaire de l'électron e, le statut de la constante G restant une question ouverte,

Ces trois constantes universelles présentent toutes un lien fort avec le vide considéré comme l'espace-temps défini par Einstein,

Le choix de la constante h et de la balance de Kibble comme dispositif choisi pour sa mesure, cette constante servant de fondement à la définition du kilogramme, n'est probablement pas le choix technologique optimum pour réduire la part de contingence dans cette définition.

Nous montrerons également que les décisions qui ont été prises pour optimiser le SI, notamment pour la redéfinition du mètre, de la seconde et du kilogramme, relèvent d'une situation contingente, liée à l'état et l'évolution des demandes industrielles et de la technologie moderne, et ont pour au moins deux unités de mesure du SI, la candela et la môle, conduit à des décisions politiquement et économiquement nécessaires, bien que parfois discutables sur un plan purement théorique.

Un premier chapitre est consacré aux définitions d'une unité de mesure et de la dimension qui lui est attachée. Il va nous permettre une compréhension des concepts fondamentaux sur

lesquels reposent l'élaboration d'un système d'unités de mesure acceptable par une large communauté de scientifiques mais également des divers acteurs du monde industriel et économique.

Il va nous permettre une compréhension du rôle fondamental des technologies de mesures, de leur évolution sous l'impulsion des ingénieurs du monde industriel. Il met en lumière le lien fort existant, depuis le début de la révolution industrielle, entre le monde économique, le développement de nouvelles technologies et le besoin croissant de précisions dans les mesures. Enfin il nous permettra de comprendre pourquoi le choix des constantes fondamentales, comme objet de référence pour les différentes unités, a été fait dès le 19ème siècle même si sa mise en pratique a demandé plus d'un siècle.

Un second chapitre est consacré à la compréhension des constantes fondamentales, nouvelles références de toutes les unités de mesure, à l'analyse de leur nature, de leur conventionnalisme, mais aussi de leur nécessité en tant que grandeurs physiques fondamentales. La première partie est consacrée aux constantes dimensionnées et à celles adimensionnées ; nous examinons notamment le conventionnalisme des unités attachées aux constantes dimensionnées.

La seconde partie aborde la délicate question de la taxinomie et du dénombrement de ces constantes ; nous montrons que ce dernier est fortement corrélé à l'état des connaissances en physique ainsi qu'aux conventions choisies pour le nombre de dimensions nécessaires dites primitives.

La troisième partie aborde le débat sur le statut de constante fondamentale de certaines constantes physiques comme k la constante de Boltzmann, G la constante de gravitation et e la charge électrique élémentaire.

La quatrième partie traite de la réalité et de l'existence d'un nombre minimum non réductible de ces constantes. Nous essayons d'apporter une contribution à cette question, toujours ouverte, du nombre d'unités nécessaires à la description de la Réalité.

La cinquième partie traite du lien entre les modèles mathématiques élaborés pour modéliser les énoncés des théories physiques et la réalité de l'existence des constantes fondamentales.

La sixième partie aborde la question de la mesure de ces constantes, celles-ci n'étant, par définition, pas calculables à partir des théories fondamentales dont nous disposons, ainsi que leur variabilité en fonction de la position de l'observateur sur l'espace-temps riemannien ; en d'autres termes nous nous posons la question de la réalité d'une éventuelle variation temporelle et spatiale des constantes dimensionnées ou non. Nous discuterons aussi dans cette partie du conventionnalisme et du réalisme de ces constantes et de leur interprétation dans une vision conventionnaliste.

La septième partie aborde brièvement de l'intérêt physique, mais aussi métrologique et industriel, de fixer conventionnellement la valeur des constantes servant de base à la définition des unités du système de mesure. Nous montrons qu'il existe un lien entre le sous ensemble des constantes fondamentales, celui des constantes universelles, avec la matière-espace-temps, ou la corrélation entre espace-temps et matière, que Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro étudient en partant du modèle standard des particules et de la mécanique quantique et la théorie de la relativité[5].

Le chapitre trois vise à établir un lien entre d'un côté l'évolution des idées dans le domaine de la métrologie et de l'autre les évolutions des sociétés civiles et économiques depuis la fin du 18ème siècle. Nous débutons cette analyse par la première constitution d'un système d'unités normalisées et unifiées lors de la révolution française ;

La première partie décrit les raisons des choix réalisés et les difficultés rencontrés tant vis-à-vis des connaissances en physique que des réticences aux changements des groupe sociaux concernés.

[5] Cohen-Tannoudji G. & Spior M., 1986, la matière-espace-temps, la logique des particules élémentaires, Fayard le temps des sciences

La seconde partie décrit rapidement l'évolution historique des trois unités primaires, le mètre, la seconde et le kilogramme depuis la construction du premier système d'unités normalisées. Les évolutions dans les sciences physiques et les technologies associées sont analysées en termes d'interconnexions entre les progrès des sciences physiques, les technologies industrielles et les enjeux économiques. Nous comparons l'évolution de la définition du mètre qui a conduit à la définition actuelle en fonction de la constante c avec celle proposée pour le kilogramme unité en fonction de la constante h. Nous montrons que la méthodologie qui a permis la détermination de la valeur de la constante fondamentale h avec une précision suffisante, de façon à pouvoir la fixer conventionnellement, permettant dans une seconde étape d'exprimer la valeur du kilogramme comme une fonction de cette constante h, présente certaines analogies avec celle utilisée pour la redéfinition du mètre à partir de la valeur de la constante c dont la valeur a été également fixée conventionnellement ; nous montrons cependant que la méthodologie adoptée pour la définition du kilogramme s'en distingue nettement de par la nature même du concept de masse. Nous nous interrogeons sur le choix de la balance du Watt proposée par Kibble comme principale solution technique pour la mesure de la constante h et de l'étalonnage des différentes masses représentant le kilogramme. Nous analysons en particulier la proposition faite par C. Bordé de la possibilité de se référer à la fréquence de de Broglie et nous discuterons son analyse sur la prise en compte, sur le plan théorique, du concept d'espace-temps à cinq dimensions alors que celui défini par Einstein n'en suppose que quatre.

La troisième partie décrit l'évolution de la définition de l'unité de masse, le kilogramme, en fonction de l'évolution des concepts physiques. Dans cette partie nous discutons le concept de masse et étudions les différentes solutions envisagées pour la nouvelle définition de l'unité de masse. En dehors de cette unité de masse, du temps, plus précisément la durée, dont l'unité, la seconde, ne permet que la mesure des intervalles et non la compréhension du temps absolu, toutes les unités de mesure se réfèrent à des grandeurs intuitivement et immédiatement compréhensibles car perceptibles par nos sens, ce qui n'est pas le cas de la masse en dehors du principe d'inertie et de la masse associée encore objet de discussions :

Le mètre comme une unité de longueur,

Le Kelvin comme l'unité de température, grandeur que nous associons sans difficulté particulière au mouvement des particules ou atomes,

La mole représentant un nombre de molécules ou d'atomes,

La Candela mesurant l'intensité lumineuse, c'est-à-dire le nombre de photons reçus dans des conditions précises,

L'Ampère, que l'on interprète comme un flux d'électrons, un nombre de particules, par seconde.

Nous analysons les principales raisons qui ont conduits les métrologues à repousser la redéfinition du kilogramme à partir de constantes fondamentales jusqu'à maintenant. Nous montrons que l'une de ces raisons est que le concept de masse n'est pas aussi intuitif que les autres grandeurs représentées par les unités de mesure du système international actuel. La masse n'est qu'une caractéristique d'une autre grandeur, la matière qui est à ce jour physiquement mal définie et non mesurable, aucune unité de mesure ne lui étant attachée. La masse n'est perceptible que par l'intermédiaire de deux effets : la gravitation résultant d'une déformation de l'espace-temps et le principe d'inertie dont l'explication est encore l'objet d'études même si la mécanique relativiste semble apte à fournir une explication satisfaisante.

Nous décrivons l'évolution des technologies utilisées pour mesurer et définir l'unité de masse. Une discussion plus approfondie des principales questions ouvertes portant sur ce concept, l'utilisation de dispositifs quantiques dans cette mesure de la masse et le choix de la constante de Planck comme référence pour la définition du kilogramme ne sont que

succinctement évoqués dans cette partie, l'essentiel de la discussion se trouvant dans le chapitre quatre consacré aux réponses aux questions soulevées dans les trois premiers chapitres.

La quatrième partie étudie quelques exemples des systèmes d'unités naturels élaborés à partir du seul jeu des constantes universelles, sous ensemble de celui des constantes fondamentales. Nous examinons notamment le lien existant entre la définition d'un jeu de dimensions primitives et celui des constantes fondamentales qui lui sont associées. Nous nous interrogeons à cette occasion sur les différentes propositions de système d'unités naturels proposées par différents auteurs comme Planck, Stoney et d'autres. Nous nous posons la question de l'existence d'un système naturel d'unités qui soit absolu. Enfin nous nous interrogeons sur les influences existantes entre notre représentation de l'Univers et le choix des constantes fondamentales, apparaissant dans les grandes théories que sont la mécanique quantique et la relativité, comme base de la définition des unités de mesure. Au-delà de la simple analyse de la divergence de vue pouvant exister dans certains cas entre la science métrologique et les idées les plus avancées en physique théorique, des propositions sont formulées pour tenir compte de l'évolution de notre représentation du monde réel. Nous tentons de comprendre en quoi ces systèmes naturels sont plus fondamentaux que par exemple le jeu d'unités de mesure choisi par le SI, et en quoi ces systèmes vont nous rapprocher de la Réalité qui nous restera de toute façon inaccessible. Nous examinerons également la tentative de création d'un système d'unités minimum obtenu par un choix conventionnel de dimensions conduisant à des constantes dimensionnées de valeur unité. Enfin, nous montrerons que les constantes reconnues aujourd'hui dans l'état actuel de nos connaissances en physique présentent toutes un lien fort avec le vide, posant la question d'une éventuelle interdépendance entre ces constantes et donc entre les unités de mesure primaires via la nature du vide et donc l'existence d'une théorie plus fondamentale qui regrouperait toutes les théories physiques connues.

Le quatrième chapitre est consacré aux questions soulevées dans les trois premiers chapitres, questions qui sont regroupées dans quatre groupes :

Sur la définition des unités de mesure,

Sur les énoncés de lois physiques et de la formulation des modèles mathématiques associés,

Sur le choix des différentes constantes associées aux unités, les différences entre les mesures selon les lois physiques classique et quantique, notre perception et notre représentation du monde,

Sur les conséquences du caractère à la fois contingent et nécessaires des unités de mesures et la compréhension du concept de masse, grandeur représentée dans le système de mesure international par le kilogramme.

Chaque question est reformulée et discutée ; nous ne tenterons d'apporter une réponse qu'à un petit nombre d'entre elles, pour la majorité des autres nous ne ferons que préciser la question, la préciser, la considérer sous un angle différent ou apporter quelques éléments complémentaires destinés à la clarifier, la réponse définitive relevant du domaine de la physique fondamentale.

Unités de mesure et dimensions dans les sciences physiques

Pour commencer cette étude, il nous paraît essentiel de définir deux concepts qui vont se situer au centre de notre discussion : les concepts d'unités de mesure et de dimension associée à ces unités.

Les unités de mesure

Lorsque l'on parle d'unités de mesure, il faut admettre comme préalable que notre système de perception soit capable de nous faire prendre conscience d'objets extérieurs à nous et dont nous pouvons décrire certaines caractéristiques à l'aide d'un ensemble fini de grandeurs. Notre système de perception n'est pas la cause de l'existence d'un système d'unités, mais il en est un élément de nécessité. Nos sens nous conduisent de façon intuitive vers le concept de grandeurs dont découle celui d'unité de mesure.

Par exemple, l'observation visuelle d'une pierre va nous permettre de définir plusieurs grandeurs observées par notre système de vision cette description étant complétée par notre sens du toucher : l'image émise par cet objet, constitué des ondes électromagnétiques émises par chaque atome ou molécule de sa surface, image que nous appellerons ici le sensible, va être transmise à notre œil en tant que récepteur de celle-ci un peu à la façon de l'image reflétée par un miroir.

L'analyse de cette image, par notre cerveau, va nous conduire en s'appuyant sur notre expérience, notre vécu, et nos connaissances, à définir la forme de cet objet en la comparant à d'autres objets, de même nature auxquels nous avons été confrontés soit directement par expérience, soit par apprentissage au sein de notre entourage ou de diverses expériences, et qui vont nous servir de référence. La préemption de cette pierre va nous permettre, toujours par comparaison, à évaluer l'intensité de la force de gravitation qui s'exerce sur elle comme sur notre corps, donc la quantité de matière présente caractérisée par sa masse que nous relions logiquement au phénomène de gravitation. En plus de ces grandeurs auxquelles nous allons attribuer une valeur comparative par rapport à un ensemble d'objets de référence, nous allons énoncer pour cette pierre un ensemble de qualités comme par exemple sa couleur, sa dureté, sa brillance, etc…

Avec l'ensemble de ces éléments, ces caractéristiques, nous allons pouvoir délivrer une description de cette pierre et la classer selon un système logique de référence. Si nous pouvons comparer les qualités d'un objet par rapport à une collection d'autres objets similaires, nous ne pouvons pas directement leur attribuer une valeur numérique en se référant à une échelle conventionnellement fixée. Dire que notre pierre est jaune foncé pourra conduire à situer cette couleur sur une palette de couleur établie à partir d'observations sur plusieurs objets considérés comme des références, mais aucune valeur numérique ne pourra être déduite sauf de manière purement conventionnelle. Par contre, la comparaison de sa forme va nous permettre de comparer ses dimensions : sa largeur, sa longueur et sa hauteur ; de même en utilisant une balance il va nous être possible de comparer sa masse avec celle d'objets de référence et donc d'attribuer une valeur quantitative à cette masse.

Cette attribution de valeurs numériques à des quantités repose également sur un préalable : le choix et la définition d'une unité de référence à laquelle on va attribuer une valeur numérique conventionnelle égale à une unité et celui d'un système de numération, par exemple décimal, associé à un ensemble de lois mathématiques à partir desquelles nous allons pouvoir effectuer des opérations mathématiques telles que par exemple les additions, les multiplications et les opérations de symétrie, d'associativité et de commutativité conduisant à une structure de corps pour ce système de numération. En agissant ainsi nous lions le résultat de notre perception sensorielle à un ensemble de théories mathématiques qui vont nous permettre d'ordonner, de classer et de modéliser l'ensemble des phénomènes accessibles à nos sens ou aux appareils de mesure qui en sont les prolongements.

Une unité de mesure est ainsi définie, de façon naturelle, comme la grandeur associée à un objet que nous choisissons de façon arbitraire. Ce choix répond principalement à des raisons de commodités par rapport à nos activités quotidiennes et un souci de stabilité dans le temps. C'est ainsi que la première unité de longueur reconnue internationalement fut celle liée à une barre de métal dont la longueur était justifiée comme une fraction du méridien terrestre, la valeur choisie de cette fraction conduisant à une taille pratique en cohérence avec l'ensemble des activités humaines : elle était proche de la taille d'un homme et donc pouvait correspondre à de nombreux objets utilisés par le plus grand nombre.

La référence définie comme unité peut être matérialisée par un artefact, comme ce fut le cas jusqu'en 2019 pour l'unité de masse, le kilogramme, ou bien faire référence à un phénomène dont la nature, la stabilité et l'utilisation seront acceptables par toutes les catégories d'utilisateurs. Par exemple, définir la référence de l'unité de longueur, le mètre, comme le temps de vol dans le vide d'un photon d'une durée convenue présente un degré de précision suffisant, une mise en pratique abordable par l'ensemble des utilisateurs professionnels, les industriels et les laboratoires de métrologie, et fait référence à la propagation de la lumière, phénomène acceptable et compréhensible par tous les utilisateurs.

Mais une unité définie de cette manière laisse plusieurs questions sans réponses :

Doit-on nécessairement utiliser pour référence une quantité de la grandeur considérée qui est compatible avec l'échelle humaine ?

Doit-on obtenir nécessairement le consensus de l'ensemble de tous les utilisateurs y compris l'homme de la rue ?

Si un artefact présente nécessairement une instabilité intrinsèque liée à sa matérialisation quels sont les critères de choix d'une référence physique matérialisée ?

Un système de mesure est donc un ensemble de références, appelées unités, qui sont choisies par convention. Le nombre de ces unités est, sauf exception que nous étudierons au chapitre 2.4, supérieur ou égal au nombre des unités primaires. Le principe de base de tout système d'unités est que toutes les mesures réalisées sur une même grandeur, dans les mêmes conditions doivent conduire, aux erreurs de mesure près, au même résultat numérique quel que soit le point de l'espace-temps considéré. Ce principe toujours vérifié depuis l'antiquité se trouve battue en brèche depuis l'apparition de la mécanique quantique qui postule que le résultat d'une même mesure pratiquée avec le même dispositif de mesure ne conduira au même résultat de mesure que de façon statistique. Cette indétermination fondamentale liée aux concepts fondamentaux de la physique quantique conduit à une limite dans la recherche sur une précision toujours plus grande dans les actes de mesure.

Le choix des références pour chaque type de grandeur a toujours dépendu fortement des hommes qui en ont eu la responsabilité. Dans l'antiquité, et encore jusqu'à la révolution française, l'existence de nombreuses unités étaient directement liées à l'autorité par laquelle elles existaient, généralement au seigneur ou au souverain local : ce fut le cas notamment pour les longueurs mesurées en pouces, coudées, pieds dont la valeur pouvait varier fortement d'une région à une autre. Les unités de volumes dépendaient souvent des us et coutumes et du bon

vouloir de celui qui détenait le pouvoir. Par ailleurs, le nombre d'unités nécessaires était entièrement lié aux besoins économiques du moment et pouvaient se multiplier localement ou dans le temps sans pour cela abandonner les anciennes unités encore utilisées par une partie de la population. Dans le royaume de France on compta en même temps l'existence jusqu'à plusieurs centaines d'unités relatives aux grandeurs de la vie courante.

À ce stade de notre réflexion, une importante question se présente : de combien d'unités avons-nous besoin pour mesurer tout ce qui compose notre réalité accessible directement par notre perception sensorielle ou les instruments de mesure qui en sont le prolongement ? Comme nous le verrons en détail dans le chapitre 3, trois unités dites primaires sont nécessaires : une unité de distance, une unité de durée et une unité de masse.

Les unités de mesure sont indispensables à tous les échanges économiques et aux validations et évolutions des théories physiques : sans mesures, pas de test de falsification possible et pas de quantification des phénomènes et par voie de conséquence pas de modélisation mathématique possible.

Cette constatation rend le choix des unités utilisées primordial tant pour le progrès de la connaissance que pour la bonne marche de notre société fondée principalement sur le commerce. Le choix d'une unité, dont la matérialisation conduit à une quantité dans les limites de l'échelle humaine est ainsi fortement contrainte par l'utilisation de cette unité par le plus grand nombre. Ce n'est pas le choix de la grandeur pour laquelle on définit une unité, ni le choix du phénomène sur lequel va reposer la définition de cette unité qui seront importants, mais plutôt la validité de l'amplitude choisie pour une unité donnée vis-à-vis des théories physiques qui vont l'utiliser.

Prenons un exemple : Choisir l'unité de masse comme le kilogramme, quantité de matière correspondant à une utilisation humaine au quotidien, et choisir comme définition de cette unité la seule matérialisation d'un unique objet de référence va entraîner, outre le défaut de précision lié aux corrosions éventuelles, plusieurs questions :

Cette définition de l'unité de masse au niveau macroscopique reste-t-elle valable aux échelles microscopiques ?

Le choix de la référence du kilogramme à partir d'autres masses est-elle possible ?

Peut-on choisir comme référence unité une grandeur dont on ne connaît pas la nature, ce qui est le cas aujourd'hui pour la masse ?

Ces questions relativement à l'unité de masse seront abordées plus en détail dans le chapitre 3. Mais au-delà de cet exemple particulier, une question plus générale se pose : peut-on et doit-on choisir comme unité de référence d'une grandeur particulière, une quantité de cette même grandeur ou doit-on nécessairement faire référence à des phénomènes distincts ?

Que signifie choisir une unité parmi les objets d'une même classe de grandeur, peut-on par exemple choisir comme référence de longueur celle d'un objet matériel particulier ? A priori rien ne s'y oppose ; comme nous le verrons plus loin, il a été par exemple un moment question d'utiliser la masse d'une particule élémentaire comme référence pour la définition de l'unité de masse, le kilogramme. Mais le concept de masse est directement lié à celui de perception sensorielle, celle du toucher : la constitution de l'être humain est telle qu'il lui est possible de comparer les intensités de la pesanteur terrestre, donc indirectement la masse de l'objet qu'il tient en main. De même, les dimensions d'un objet vont être perçues par notre système visuel et en utilisant un objet de référence comme une règle graduée avec laquelle il sera possible d'attribuer une valeur numérique à sa longueur. Mais quelle image est transmise à nos yeux, quelle information recevons-nous ? Nous percevons les ondes électromagnétiques émises par l'objet que nous mesurons, en aucun cas nous ne percevons l'objet lui-même, nous ne percevons que l'information contenue dans ces ondes électromagnétiques émises par la surface de cet objet. Ces informations peuvent d'ailleurs être mises en évidence en regardant l'image de l'objet dans un miroir. Cette image n'est pas la réalité de l'objet mais son apparence telle qu'elle

résulte des ondes émises par lui. Ces informations qui ne sont ni l'objet ni l'observateur, nous les appellerons « le sensible » comme le propose Emanuele Coccia[6].

« Si quelqu'un pose un objet coloré sur l'œil, il ne verra rien. Il ne suffit pas de faire qu'un objet interagisse avec un sujet pour que se produise la perception. »

Ainsi les grandeurs se rapportant à des objets d'une même catégorie, dont nous avons besoin de connaître le rapport avec une grandeur choisie comme référence, sont le produit direct de notre perception sensorielle interprétée par notre système cérébral. Nous verrons, dans le chapitre 4, que les trois grandeurs primaires, les masses, les longueurs et les durées sont non seulement suffisantes pour attribuer une valeur numérique à toute grandeur qui nous est perceptible directement ou indirectement par notre système sensoriel, mais présentent également un lien relationnel fort.

Le concept de dimension en physique

Si nous consultons un dictionnaire[7], nous trouvons au mot « dimension » :

« Grandeur réelle, mesurable, qui détermine la portion d'espace occupée par un corps,
Grandeur mesurable, selon une direction ou par rapport aux autres dimensions,
Grandeur réelle qui, seule ou avec d'autres, détermine la position d'un point,
Formule de dimensions : rapport de deux grandeurs dont dépend une autre grandeur. »

Étrangement il n'est fait ici aucune mention concernant la dimension en tant que dénomination d'une grandeur de classe d'objets qui ne peut pas être reliée à une autre. Par exemple, les distances auront la dimension d'une longueur qui sera indépendante des classes de grandeurs comme les durées ou les masses.

Qu'est-ce qu'une dimension ? Une dimension est une classe de grandeurs pouvant être considérées comme ayant une même nature : par exemple, les mesures de l'encombrement spatial de différents objets avec une règle vont conduire à l'établissement d'une liste de valeurs, toutes exprimées avec la même unité, le mètre, cet ensemble de valeurs constituant la classe de la mesure de l'encombrement spatial de ces objets.

Lorsque nous regardons le ciel nocturne, nous distinguons la lune, des étoiles et des planètes. Ces différents objets nous semblent éloignés et leur diamètre apparent est bien sûr directement lié à leur éloignement par rapport à nous. Cet éloignement que nous appelons distance appartient à une classe de dimensions, celle de l'éloignement entre deux points de l'espace, celle des distances géométriques. Remarquons que cette notion de distance n'a pas la même signification selon que l'on se réfère à la mécanique Newtonienne ou celle relativiste[8] développée par Einstein.

Combien de dimensions sont nécessaires pour décrire tout ce que nous connaissons de l'Univers tel que nous le percevons ? L'état de nos connaissances, les diverses expériences réalisées depuis plus de quatre siècles et notre intuition semblent démontrer que trois dimensions spatiales, une dimension de mesure des durées, la seconde, et une permettant la comparaison des masses associées à la quantité de matière sont nécessaires et suffisantes pour décrire et attribuer une valeur numérique, à partir d'une référence conventionnelle, pour n'importe quelle grandeur observable connue aujourd'hui. Ces trois dimensions, que nous

[6] Coccia E., 2010, la vie sensible, Éditions Payot & Rivages, pp 23-25

[7] Dimension, Petit Larousse, edition 2007

[8] En mécanique newtonienne, la distance entre deux points se définit par une ligne droite alors que selon la théorie de la relativité, la distance correspond au trajet effectué par un photon reliant les deux points, trajectoire qui va suivre les courbures de l'espace-temps formant ainsi des géodésiques. Pour les instruments de mesure la distance vraie sera plus longue que la distance géométriquement prédite selon les lois de la mécanique newtonienne.

qualifieront dans la suite de cette étude de primitives, correspondent à trois groupes de grandeurs : celui des distances, des durées et des masses.

La question n'est pourtant pas encore refermée. Deux opinions différentes sont soutenues par les philosophes et les physiciens ; la première considère que les dimensions des quantités physiques sont une propriété intrinsèque de la nature et de la quantité d'un objet ou d'un système.

« Les dimensions d'un objet ou bien d'un système, sont les propriétés mesurables qui peuvent être utilisées pour décrire un état physique. Les dimensions sont des propriétés qui peuvent être mesurées et les unités qui les accompagnent sont les éléments standard avec lesquelles les dimensions peuvent être mesurées numériquement pour décrire de façon quantitative une situation donnée. »[9]

La seconde opinion soutient que les dimensions ne sont que les conséquences des calculs lorsque les unités des quantités primaires sont modifiées.

« Les équations aux dimensions d'une quantité physique expriment la dépendance numérique de l'unité de cette quantité en fonction des unités fondamentales et secondaires desquelles elle est dérivée, et les exposants appliqués déterminent la dimension d'une unité en accord avec les unités choisies. Utilisée dans un sens restreint, l'équation aux dimensions indique uniquement les relations numériques entre les diverses unités choisies. »[10]

Examinons la seconde loi de Newton :

$$F = m\gamma$$

Où m représente la masse observée et γ son accélération dans un repère inertiel lié à l'observateur qui réalise la mesure. Selon le système d'unités de mesure international, le SI, la force F aura pour dimension $[M][L][T]^{-2}$. Mais si nous posons de façon conventionnelle que la force F doit s'exprimer avec sa propre dimension que nous désignerons par [F], alors nous devrons introduire dans l'équation aux dimensions une constante additionnelle k pour satisfaire une nécessaire homogénéité dimensionnelle :

$$[k] = [F][T]^2[L]^{-1}[M]^{-1}$$

Ajouter une dimension supplémentaire conduit à introduire une nouvelle constante dans les relations mathématiques justifiant les hypothèses physiques introduites par une théorie. La constante k que nous avons été amenés à introduire pour respecter l'homogénéité des dimensions dans notre exemple, ne correspond pas à une nécessité de la nature, son existence est purement conventionnelle et liée à notre décision de choisir une dimension nouvelle pour les forces, distinctes des trois dimensions primaires considérées comme suffisantes.

Le nombre de dimensions semblant être une pure convention, de nombreux auteurs ont comparé différents ensembles de dimensions primitives. Tolman[11] a soutenu l'idée que cinq dimensions primitives étaient nécessaires pour décrire entièrement le monde tel que nous le percevons et que nous appelons la réalité : une dimension de longueur, une de temps, une de quantité d'électricité, une de quantité de matière et une d'entropie. Ces cinq dimensions correspondent à cinq différents concepts physiques contraignant fortement notre connaissance de l'Univers, de notre réalité : celui d'espace, celui de temps, celui de matière, celui d'électricité et enfin celui du degré de liberté. Tolman[12] pense que ces grandeurs de référence sont extensives ce qui justifie son choix de l'entropie plutôt que de la température comme dimension primitive. Pour sa part, Ducanson[13] pense, lui, que quatre quantités sont suffisantes : la masse, la longueur,

[9] Douglas J. F., 1969, Dimensional Analysis for Engineers, Pitman, London

[10] Williams W., 1892, On the relation of the dimensions of physical Quantities to Directions of Space, Phil. Mag., 34, § 208, p. 237

[11] Tolman R. C., 1917, The Measurable Quantities of Physics, Phys. Rev. ,9, 237-253

[12] Tolman R. C., 1917, The Measurable Quantities of Physics, Phys. Rev. ,9, 237-253

[13] Ducanson W. E., 1941, The Dimensions of Physical Quantities, Proc. Phys. Soc., 53, 432-448

le temps et la quantité d'électricité, la charge électrique. Burniston et Brown[14] pensent eux, qu'un ensemble de deux grandeurs de référence, la longueur et le temps, sont suffisantes et doivent être préférées parce que ces deux quantités sont toujours les seules impliquées dans les lois de la physique. Quant' à Dingle[15], il soutient l'idée que le nombre de quantités de référence importe peu ; tous ces systèmes de référence sont acceptables car chacun ne représente qu'une convention particulière. Nous constatons donc pour le moins, qu'il n'existe aucun consensus se dégageant de ces diverses positions.

La question que nous devrions nous poser pourrait être formulée de la façon suivante : combien de grandeurs ne peuvent-elles pas être définies à partir d'un système d'unités choisi. Par exemple dans le système proposé par Burniston et Brown, comment peut-on exprimer l'unité de masse en fonction des seules dimensions de longueurs et de durées. Considérons l'expression donnant la force de pesanteur dans le cadre de la mécanique Newtonienne :

$$P = mg$$

L'accélération de la pesanteur va s'exprimer simplement en fonction des deux uniques dimensions de longueur et de durée, la dimension d'accélération sera $[M][T]^{-2}$. Mais ne disposant que de ces deux dimensions les quantités de masse et de poids, ne peuvent être exprimées que comme des combinaisons a priori libres de ces deux dimensions. Quelle que soit la combinaison choisie de façon conventionnelle, nous perdrons une partie de l'information concernant ces deux quantités que sont la masse et la force de pesanteur. Exprimer la dimension d'une quantité de masse en fonction des seules longueurs et durées va rendre confuse la compréhension du concept de masse ; celui-ci étant une propriété de la matière dont nous ne connaissons pas la nature, comment comprendre cette propriété résultant d'une interaction d'un champ quantique avec la matière comme une quantité exprimée en termes des seules longueurs et durées. Il nous semble, qu'en l'état de notre compréhension du monde, de notre réalité accessible, le nombre de dimensions ne peut être complétement conventionnel. En effet, certaines grandeurs ne peuvent, dans l'état de compréhension des lois de la nature, s'exprimer qu'avec une dimension spécifique, ou une dimension primitive. On peut penser que les longueurs peuvent être mesurées en unités de longueur, le mètre dans le SI, ou en seconde lumière, ce qui revient à les exprimer en mètres et en secondes, l'unité retenue pour la mesure du temps dans le SI. Nous pourrions utiliser alors un système de dimensions primitives constitué des seules dimensions de temps et d'énergie, comme le font les physiciens atomistes, mais cela entraînerait une perte d'informations semblable à celle de la projection d'une représentation d'un objet en 3D sur un plan de dimensions 2D. Comme nous le verrons plus en détail plus loin dans le chapitre 2, le système d'unités des atomistes attribue une dimension d'énergie aux masses et une dimension de l'inverse d'une énergie aux longueurs et au temps. La réduction du nombre de dimensions est toujours possible, mais le prix à payer est une perte d'informations, donc une part de compréhension du monde dans lequel nous vivons, compréhension formée à partir de représentations, d'images mentales résultat de l'interaction des informations sensorielles traduites par nos expériences et connaissances emmagasinées dans notre système cérébral.

Mais alors peut-on définir ce nombre optimal de dimensions primitives que nous devons retenir ? La majorité des physiciens estime, comme le soutenait en 1941 Ducanson[16], que quatre dimensions primitives sont nécessaires pour décrire les objets de notre réalité sans perte d'informations : les longueurs, le temps, les masses et la quantité de charges électriques. Ces mêmes physiciens reconnaissent que la dimension décrivant ces charges électriques peut s'exprimer comme une fonction des trois autres dimensions si l'on accepte comme vraies les

[14] Burniston Brown G., 1941, A new treatment of the Theory of Dimensions, Pro. Physi. Soc., 53, 418-432
[15] Dingle H., 1942, On the dimensions of physical magnitudes, Phil. Mag., 33 § 220, p. 321-334
[16] Ducanson W. E., 1941, The dimensions of physical quantities, Pro. Phys. Soc., 53, 432-448

théories physiques modernes : la mécanique relativiste, la mécanique quantique, la physique statistique et l'électrodynamique classique et quantique.

Le choix de ces dimensions est conventionnel, seul le nombre de quatre semble ne pas l'être. Pourquoi estimer que quatre dimensions primitives sont nécessaires et suffisantes plutôt que trois ? Des dimensions seront dites primitives si elles ne peuvent s'exprimer en fonction des autres ; cette position peut paraître conventionnelle mais en fait elle ne l'est pas, au moins pour le nombre de dimensions nécessaires à la description de l'Univers que nous percevons et que nous pouvons mesurer. Un certain nombre de dimensions semblent n'avoir aucun lien conceptuel avec les autres : c'est le cas des longueurs ou du temps qui ne présentent pas de liens avec par exemple la masse ou la quantité de charges électriques. A contrario, la dimension de l'énergie pourra se comprendre comme par exemple le produit d'une masse par le carré d'une vitesse. Le fait que la masse, les longueurs, le temps ou la quantité de charges électriques soient des quantités de dimensions indépendantes les unes des autres n'implique pas nécessairement qu'elles doivent constituer le groupe des dimensions de base sur laquelle un système de mesure va s'appuyer ; on pourrait tout aussi bien choisir un autre ensemble de quatre dimensions pour former cette base du système de mesure. Par exemple, les systèmes de Hartree ou de Ludovici[17], sur lesquels nous reviendrons plus longuement dans le chapitre 3 (§3.4) peuvent constituer une alternative à notre système d'unités de mesure. Le groupe constitué de la masse, de la longueur, du temps et de la charge électrique peut être considéré comme un choix a priori, mais pas comme le choix de la nature ; nos connaissances sur la nature de ces quatre quantités ne sont pas suffisantes pour qu'il soit possible de se prononcer à ce sujet.

Le système utilisé à ce jour ne comporte que trois unités primaires : la masse, le temps et les longueurs. La charge électrique peut s'exprimer, comme nous venons de le dire, en fonction de ces trois dimensions même si de façon intuitive elle n'a aucun lien physique avec ces trois grandeurs. Ainsi, bien qu'au moins quatre grandeurs semblent être indépendantes les unes des autres, la masse, le temps, les longueurs et la charge électrique, le système de mesure actuel s'appuyant sur les relations mathématiques des théories fondamentales de la physique aboutissent à un nombre de trois dimensions primaires seulement ; les physiciens conviennent habituellement de choisir la masse, le temps et les longueurs, mais remplacer l'une quelconque de ces grandeurs par la charge électrique aboutira au même résultat.

Ce nombre de dimensions primitives est-il le reflet d'une vérité fondamentale de la nature ? Nous n'en savons rien, mais il est certainement celui de la compréhension du monde dans lequel nous vivons. Quelle est la nature des quatre grandeurs temps, espace, masse et charge électrique, sont-elles réellement toutes indépendantes, telles sont les questions auxquelles les physiciens et les philosophes doivent répondre pour tenter de réduire ce nombre de dimensions primitives. Ces quatre grandeurs présentent-elles un lien ? Peut-on relier la masse, les distances, la charge électrique et le temps avec l'espace-temps ? Sur cette question Johnson[18] fait remarquer que :

« Si nous augmentons le nombre de quantités de référence et le nombre de dimensions, nous sommes obligés d'introduire un grand nombre de nouvelles constantes dimensionnelles, chacune étant découverte par l'expérience, une pour chaque quantité considérée comme dérivée. ».

Il est ainsi fondé à se poser la question de savoir si ce nombre de trois ou quatre dimensions primitives est une caractéristique intrinsèque de la nature, ou bien n'est qu'une conséquence de la convention de représentation formelle que nous avons choisie. Un indice, nous permettant cependant de vérifier si ce nombre de quatre dimensions primitives est soutenable, consisterait à montrer que ce nombre entraînerait une plus grande richesse dans l'information que nous retirons de la description de la nature.

[17] P. Jonhson, 1997, the constants of nature, Ashgate Singapore, p. 90-91
[18] Johnson P., 1997, The constants of Nature, Ashgate, Singapore, p. 82

Le système de mesure qui est adopté aujourd'hui repose sur seulement trois dimensions primaires : les longueurs définies en mètres, les masses définies en kilogramme et le temps défini en secondes. Toutes les autres unités, y compris la charge électrique, peuvent être considérées comme des unités dérivées car exprimables en fonction de ces seules grandeurs dimensionnelles. Le nombre de dimensions fondamentales peut-il être considéré comme purement conventionnel ? Nous ne le pensons pas car réduire, par exemple, le nombre de dimensions fondamentales à deux conduirait à une perte d'informations limitant notre représentation de notre réalité. Pour opérer une telle réduction il faudrait qu'il existe un lien fondamental entre deux de ces trois dimensions permettant de déduire l'une d'elle à partir de l'autre en regroupant ces deux dimensions dans une théorie plus large. Ce n'est pas le cas dans le cadre des théories connues à ce jour, mais un artifice mathématique permet malgré tout de réduire ce nombre de dimensions comme nous le verrons dans le chapitre 3.

Que perdons-nous en nous limitant à trois dimensions primaires ? À cette dernière question nous pouvons répondre que la dimension des charges électriques non seulement n'a pas disparu de l'usage courant des physiciens mais que la réduction à trois du nombre des dimensions primaires n'est que le résultat d'un raisonnement théorique qui n'a pas de conséquences sur notre description de l'Univers. Remplacer le Coulomb, la dimension usuelle des charges électriques par son expression en fonction des dimensions de longueurs de temps et de masse va créer dans les esprits un lien fort entre cette grandeur et les trois unités liées aux dimensions primaires. La charge électrique a-t-elle un lien conceptuel réel avec le mètre, le kilogramme et la seconde, la question est ouverte. Les théories physiques n'étant valables qu'à un instant donné sans pouvoir préjuger de l'avenir, les relations mathématiques qui les composent et qui nous permettent cette réduction du nombre de dimensions primaires à trois seulement n'est que provisoirement valable. Nous défendons ici l'idée que le caractère provisoire de ces théories ne nous autorise pas à accepter de façon définitive ce nombre de dimensions primaires. En nous fondant sur ces mêmes théories et les définitions des concepts associés, il nous semble clair qu'il faille adjoindre à ces trois dimensions primaires celle de la quantité d'électricité dont le concept ne peut être décrit à partir des concepts de longueur de temps et de masse. Ainsi même si nous sommes de l'avis que le nombre de dimensions primaires doivent être établi à quatre, nous reconnaissons également que ces questions sont encore largement ouvertes aujourd'hui.

Palacios a fourni une notion d'une dimension libre de toutes considérations métaphysiques et de conventionalité. Il fait, pour cela, une distinction entre les lois empiriques reliant les quantités et les lois Universelles, entre les lois que nous découvrons empiriquement, avec celles que nous construisons à partir d'une intuition théorique et de la synthèse des résultats empiriques et par lesquelles nous définissons certaines quantités en termes d'autres (par exemple le déplacement d'une charge électrique en termes de champ électrique et de permittivité du milieu observé). C'est la différence entre grandeurs dérivées et primitives. Il est ainsi possible de définir l'ensemble minimum de lois empiriques qui, pour un ensemble donné de phénomènes, régissent le phénomène et de représenter ces lois à l'aide de relations mathématiques. Cet ensemble minimal de lois comportent les axiomes centraux.

« Dans le présent travail, l'auteur a essayé de montrer que les dimensions des quantités primaires ne peuvent être dérivées d'une définition instrumentale (méthode de mesure), mais d'un groupe d'équations fondamentales de chaque théorie et des critères qui déterminent les constantes superflues. » (Palacios 1964, p. 207)

Notre conclusion finale *est la suivante : l'analyse dimensionnelle est utile et valable uniquement lorsque les suppositions concernant les grandeurs impliquées et leurs dimensions reposent sur les équations représentant entièrement les lois numériques ou théories par lesquelles le processus en discussion est déterminé. » (Campbell 1924, p. 494)*

Palacios, par exemple affirme que la mécanique des particules nécessite trois lois, alors que dans le cas de l'électromagnétisme il faut cinq lois empiriques pour définir les phénomènes entièrement.

Pour chaque cas, le nombre de lois empiriques détermine le nombre de grandeurs de références qui sont nécessaires pour fournir une solution à l'équation homogène qui garantit l'invariance d'échelle. : Ce nombre de grandeurs de référence est égal à la dimension du vecteur d'états utilisé pour représenter la quantité physique qui apparaît dans l'équation considérée.

Palacios soutient ainsi que le facteur déterminant contre le conventionnalisme est l'apparition de termes additionnels sans dimension. Pour les conventionnalistes, ces termes additionnels ne sont que des fantômes mathématiques. Pour un réaliste comme Putman, l'existence de bons critères méthodologiques, tel l'évitement de solutions superflues est une raison suffisante pour rejeter tout conventionnalisme.

Il existe deux légitimes notions de la dimension d'une grandeur physique :

La première est liée à la représentation de liens physiques par un isomorphisme mathématique

La seconde, est enracinée dans les lois empiriques qui caractérisent le système empirique (la loi de gravitation de Newton est en inverse carré de la distance et ceci quelle que soit la représentation choisie ; ce n'est pas une question de convention)

Considérons la relation de Planck :

$$E = \hbar\omega$$

Ici, l'énergie et la pulsation sont toutes deux des grandeurs fondamentales, la pulsation étant liées à celle des durées donc du temps et la constante fondamentale assurant le lien entre ces deux grandeurs est ħ.

Levy-Leblond écrit à propos de cette relation spécifique entre l'énergie et la fréquence d'une onde électromagnétique :

« Revenant à la constante de Planck, la relation $E = \hbar\omega$*, en accord avec ce point de vue, n'est pas d'être interprétée comme établissant un lien entre deux concepts classiques, mais plutôt comme les transcendant sous la forme d'une synthèse en établissant un nouveau concept unique avec un plus large domaine d'application. Le quantum d'énergie est en effet un nouveau concept, car il associe à un état physique un spectre complet de valeurs numériques et est représenté par un opérateur hermitique, s'opposant ainsi à une fonction numérique représentant une énergie en termes classiques. Énergie et pulsation apparaissent alors comme deux facettes particulières d'une notion plus générale, chacun d'eux représentant l'unique aspect de deux points de vue différents*. »[19]

Nous pouvons donc définir une dimension comme le nom attribué à une grandeur qui ne présente pas de lien de causalité avec la nature des autres grandeurs connues, la causalité dont nous parlons ici est celle qui permettrait de comprendre une dimension comme dérivée d'un ensemble d'autres par une opération de logique mathématique.

Par exemple, les dimensions liées aux grandeurs du genre temps, distance ou masse ne peuvent pas se déduire les unes des autres, alors que les forces le seront à partir des trois dimensions qualifiées de primaires. Les charges électriques font aujourd'hui figure d'exception : elles sont, au regard des théories fondamentales de la physique, considérées comme représentant une classe de grandeur pouvant être qualifiée de primitive ; mais les équations de la mécanique classique ou relativiste rapprochées de celles de l'électromagnétisme permettent l'écriture de la dimension associée aux charges électriques en fonction des trois dimensions que sont les distances, les masses et les durées.

Doit-on accepter la conclusion de ces théories physiques et admettre quatre dimensions primitives ou bien se soumettre au verdict des modèles mathématiques associés et n'en

[19] Levy-Leblond J. M., 1977, On The Conceptual Nature of the Physical Constants, Revista del Nuovo Cimento, 7, 187 - 206

conserver que trois ? C'est cette dernière hypothèse qui constitue le paradigme actuel, bien que cette acceptation laisse ouverte la question de la compréhension de la nature de ces charges électriques en fonction des trois dimensions primitives.

L'acte de mesure en physique

Comment définir ce qu'est un acte de mesure ? La réponse à cette question nous paraît simple, intuitive, presque évidente, mais en fait elle va dépendre de la grandeur que l'on cherche à mesurer, selon que celle-ci correspond au monde macroscopique ou microscopique. Dans le premier cas on pourra négliger les effets du dispositif de mesure sur la valeur mesurée alors que dans le second cas, comme l'enseigne la mécanique quantique, il sera nécessaire de considérer le système complet constitué de l'objet mesuré et du dispositif de mesure. Dans l'état des connaissances en physique, le premier cas va conduire à une mesure de type déterministe et dans le second elle sera essentiellement probabiliste selon l'une des hypothèses fondatrices de l'école de Copenhague qui fournit l'interprétation acceptée par la majorité des scientifiques des lois de la mécanique quantique. Il est surprenant au premier abord que ce sont ces lois probabilistes qui permettent des prédictions de valeurs de quantités avec une précision jamais atteinte jusque-là.

La mécanique classique de Newton ou celle relativiste d'Einstein autorise de par leurs hypothèses de base une mesure déterministe, une continuité de valeurs possibles, c'est-à-dire reproductible si les conditions de mesure ne changent pas et aussi précise que les appareils de mesure constituant le dispositif de mesure vont le permettre.

La mécanique quantique, elle, repose sur six postulats fondamentaux [20] que l'on peut synthétiser par quelques postulats :

- Postulat 1 : description de l'état d'un système ; à un instant donné, l'état d'un système est entièrement défini par sa fonction d'onde.
- Postulat 2 : évolution temporelle du vecteur d'état ; cette évolution est définie par l'équation de Schrödinger appliquée à la fonction d'onde du système.
- Postulat 3 : description des grandeurs physiques ; toutes les grandeurs mesurables sont décrites par un opérateur mathématique agissant dans l'espace des états. Cet observateur est appelé une observable.
- Postulat 4 : mesure des grandeurs physiques ; le résultat d'une mesure ne peut donner qu'une des valeurs propres associées à l'opérateur testé.
- Postulat 5 : interprétation probabiliste de la fonction d'onde ; ce postulat connu comme celui de Born énonce que la probabilité d'obtenir la valeur propre a_n de l'observable A est égal au carré du module de la projection de la fonction d'onde sur le vecteur d'état associé à la valeur propre a_n.
- Postulat 6 : réduction du paquet d'onde ; si le résultat de la mesure de l'observable A est a_n, l'état du système immédiatement après cette mesure est la projection de la fonction d'onde sur le vecteur d'état associé à la valeur obtenue.

Ces postulats établissent qu'une mesure, même si elle est reconduite à l'identique, dans les mêmes conditions et à partir du même dispositif, ne donnera pas nécessairement le même résultat, les valeurs obtenues ayant une certaine probabilité d'occurrence autour d'une valeur centrale. La mécanique quantique est essentiellement probabiliste. Mais en plus de cette différence avec les mécaniques classique ou relativiste les fondements de la mécanique

[20] Gondran M. et Gondran A., 2014, Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?, éditions Matériologistes, collection sciences et philosophie, p.60-61

quantique admettent qu'un même objet non mesuré peut se trouver dans une superposition de tous les états possibles, un seul parmi eux s'exprimant lors de l'acte de mesure par le phénomène singulier de la réduction de la fonction d'onde. Un résultat selon cette description du monde n'est donc pas certain mais possède seulement une probabilité de réalisation. Le processus selon lequel le choix de la valeur mesurée se fait reste une question largement ouverte : effondrement de la fonction d'onde, phénomène de décohérence, Univers multiple d'Everett,…

Ces deux aspects fondamentaux de la mécanique quantique, le caractère probabiliste d'une mesure et la réduction de la fonction d'onde, sont supportés par la majorité des scientifiques qui se réfère à l'interprétation de l'école de Copenhague, élaborée par Bohr et rendent irréconciliable les mécaniques quantique et relativiste. On peut résumer cette interprétation de notre Univers comme positiviste et caractérisé par le fait que cette théorie n'est pas conçue pour décrire la réalité mais seulement pour faire des prédictions vérifiables par la mesure et fournir une interprétation cohérente des faits observés. Elle présente une grande part d'ambiguïté dans le langage utilisée ; Elle correspond à une réalité empirique, pas à la Réalité en soi. Cette propriété des mesures de phénomènes microscopiques de ne donner qu'un résultat de mesure correspondant à une des valeurs propres de l'opérateur de mesure devrait conduire à une dispersion suffisante des résultats de mesure limitant ainsi la précision que l'on peut obtenir. Or certains phénomènes purement quantiques sont utilisés pour servir de référence en métrologie, comme par exemple les effets Josephson ou Hall quantique, car ils présentent une très grande stabilité et une grande précision et une très faible dispersion des résultats de mesure. De ce constat on peut raisonnablement déduire plusieurs conclusions possibles :

- Les valeurs propres correspondant à l'opérateur lié à l'observable sont tellement proches les unes des autres que la mesure peut être considérée comme parfaitement reproductible, au moins dans la limite de précision recherchée par les industriels et les laboratoires de recherche,
- Au moins un des postulats de l'interprétation de l'école de Copenhague peut être mis en défaut dans certains processus ce qui devrait nous pousser à reconsidérer l'ensemble de ces postulats et les modifier ou les compléter,
- En fondant la mécanique quantique sur un ensemble de postulats directement déduits de mesures empiriques, on fait reposer l'axiomatique de cette théorie sur un processus inductif, objet de nombreux débats[21][22], certains acteurs[23][24] ont insistant sur les risques d'un inductivisme pur.

Les mesures en physique ne sont pas faites à partir de la seule utilisation de nos sens. Si l'on peut encore comparer, par exemple des masses et opérer un classement de celles-ci, il est difficile de donner une valeur de masse d'un objet quelconque simplement en le soupesant ; on peut avec beaucoup d'expérience donner une valeur approchée mais dont la précision sera nécessairement limitée. Pour déterminer la valeur d'une quantité avec une précision convenue à l'avance il faudra utiliser des dispositifs techniques qui seront des prolongements de nos sens, qui vont permettre d'accroître leurs capacités et donc de donner une valeur numérique de la quantité mesurée avec une précision en accord avec l'objectif avancé.

Tous les dispositifs de mesure utilisés à ce jour peuvent être compris comme une amélioration de l'un ou de la coopération de plusieurs de nos sens. Les instruments optiques

[21] Hume D., 1946 et 1983, Traité de la nature humaine, trad. A. Leroy, Bibliothèque philosophique, Aubier, Paris

[22] Russell B., 1975, Problèmes de philosophie, trad. S. M. Guillemin, Payot, Paris

[23] Duhem P., 1906, La Théorie physique, son objet, sa structure, Marcel Rivière, Paris

[24] Chalmers A. F., 1976 et 1987, Qu'est-ce que la science ? Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend, Editions La Découverte, Paris pour la traduction française

sont liés à la vue, les capteurs sonores ou de vibrations à notre ouïe, les capteurs et senseurs thermiques diverses à celui du toucher, …

Même les dispositifs électroniques peuvent se comprendre à partir de la combinaison de nos sens et de la logique telle que nous la comprenons de notre cerveau ; l'intelligence artificielle est sur ce point un exemple remarquable de mimétisme des machines par rapport à l'organisation de l'être vivant qu'est l'homme tel que nous pensons le comprendre. Ainsi, imaginons un phénomène faisant intervenir une grandeur hors du champ de notre perception ; comment pourrions-nous imaginer, concevoir son existence alors que nous n'avons aucun moyen direct ou indirect de le ressentir puis de nous le représenter. Il faudrait à minima que ce phénomène entraîne un effet indirect qui se trouverait dans le spectre de détection de nos sens. Est-ce le cas pour certains phénomènes observés et qui n'ont toujours pas reçu d'explication satisfaisante comme par exemple la matière noire ou l'énergie noire ? La question reste ouverte.

Les ondes gravitationnelles appartiennent à cette catégorie de phénomènes. Prédites comme conséquence des équations de la relativité générale, résultats d'une déformation dynamique de la trame de l'espace-temps, elles n'ont été confirmées par l'observation de leurs effets que récemment[25].

Nous ne pourrons donc pas, dans la suite de cette étude, considérer uniquement les méthodologies et dispositifs qui découlent directement de nos sens, qui en sont le prolongement ce qui va nous conduire à reconsidérer certaines questions conceptuelles notamment en ce qui concerne la compréhension des grandeurs, comme par exemple la masse, que nous mesurons à partir du système d'unités récemment modifié, le SI.

[25] B. P. Abbott et al., 2016, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, PRL 116, 061102

Évolution des unités de mesure depuis sa création

De nombreux ouvrages [26] ont montré combien la nature des constantes fondamentale, choisies comme fondement de la définition des unités de mesure du système international, le SI. De nombreuses questions restent cependant ouvertes et sont dans l'attente de réponses. Le statut même de constante fondamentale est contesté pour certaines constantes physiques. L'étape suivante dans la compréhension de ce système d'unités de mesure est le contenu de ces définitions d'unités. Comment en sommes-nous arrivés à cette décision, finalisée en 2018, de définir toutes les unités à partir d'un ensemble restreint de sept constantes fondamentales ?

Dans ce chapitre nous allons nous référer à l'histoire de notre système d'unités, sur l'évolution de la définition des unités qui le compose, et qui ont été choisies à la faveur de la révolution française. Nous allons nous interroger sur l'évolution des concepts et des technologies qui ont amené les métrologues, les différents acteurs socio-économiques et scientifiques à abandonner la définition du kilogramme, matérialisé par un artefact, pour adopter une définition purement théorique reposant sur un petit nombre choisi de constantes fondamentales.

L'objectif de ce chapitre n'est pas de faire une analyse historique mais de resituer dans leur contexte les principales étapes d'évolution de la pensée des physiciens et philosophes qui ont servi de guide à l'utilisation des unités, à leurs matérialisations et à l'évolution de leurs définitions vers une formulation conceptuelle. Notre point de départ sera la révolution française. Nous nous intéresserons plus particulièrement au cas du kilogramme, unité permettant de quantifier et de comparer les masses des objets matériels, constitués de particules élémentaires distinctes douées, chacune, d'une caractéristique de masse non nulle et donc soumis aux lois de la gravitation et de l'inertie au sens que leur donne aujourd'hui la théorie de la relativité générale proposée par Einstein.

Nous tenterons de démontrer que le choix de la balance du Watt, dispositif utilisé pour mesurer la constante de Planck et servir à la calibration des nécessaires matérialisations des artefacts diffusés dans les différents états signataires et utilisés par le monde industriel, pose la question de la validité des résultats obtenu avec un dispositif faisant coexister des dispositifs classiques et quantiques.

Nous analyserons enfin quelques tentatives de physiciens théoriciens de définir un système d'unités naturelles mettant en œuvre un ensemble de relations dimensionnelles reposant exclusivement sur un ensemble restreint de constantes fondamentales. Nous montrerons que la définition d'un tel système ne peut être absolue et que les valeurs numériques obtenues pour chacune de ces unités ainsi définies, à l'aide d'un jeu contingent de constantes fondamentales, ne peuvent être considérées comme le reflet d'un aspect plus fondamental de notre réalité.

Dans les premières années qui ont suivi la création d'un système international d'unités de mesure, à la fin du 18ème siècle, ce système ne comportait pas sept unités comme maintenant. Il ne reposait que sur trois unités : la seconde pour la mesure des durées, le kilogramme pour la mesure des masses et le mètre pour la mesure des distances. Ces trois unités sont appelées aujourd'hui unités primaires, car à partir de ces seules unités ont peut construire les quatre autres unités, introduites ultérieurement, et mesurer toutes les grandeurs connues de la science

26

moderne. À chacune de ces trois unités correspond une dimension primitive, c'est-à-dire qui ne peut s'exprimer en fonction des deux autres dimensions. A partir de ces trois unités il est possible de mesurer tout ce que l'homme observe, toutes les grandeurs qui lui sont accessibles par son système de perceptions sensorielles. Les quatre unités qui vont être ajoutées par la suite sont considérées par les métrologues modernes comme le reflet, soit de découvertes physiques majeures comme l'ampère définit par la théorie de Maxwell, soit de contingences humaines dérivant de contraintes liées aux activités techniques et économiques de l'homme, à son désir de fabriquer des objets et de les commercialiser. C'est le cas pour trois de ces quatre unités : la mole codifiant une quantité unité de matière, un nombre déterminé conventionnellement d'atomes ou de molécules, la candela quantifiant la puissance du rayonnement lumineux et le degré Kelvin mesurant la température de façon à adapter l'unité à un usage courant des hommes dans leurs activités quotidiennes. Le cas de l'Ampère reste particulier par le fait que cette unité constitue la base d'une nouvelle branche des sciences physiques, l'électromagnétisme, et que cette théorie va être à l'origine d'un bouleversement du monde économique, toujours d'actualité, celui de l'électronique et de l'informatique. La théorie de l'électromagnétisme, mise en forme par Maxwell[27], va conduire à partir du 19ème siècle au développement des premières machines électriques, puis à partir du milieu du 20ème siècle à l'émergence de l'électronique[28], technologie qui va révolutionner entièrement le monde industriel par l'invention de l'informatique et des systèmes d'automatisations et de robotiques. Ainsi, même si d'un point de vue rationnel, toutes les unités utilisées dans le domaine de l'électronique peuvent s'exprimer en fonction des trois seules unités primaires, y compris bien sur l'Ampère, cette dernière unité, bien qu'étant le reflet d'une contingence liée aux activités industrielles humaines, peut être considérée comme à la base de la majorité des activités humaines modernes. Lui accorder une position d'unité à part entière, bien qu'entièrement dépendante des trois unités primaires, peut donc être considéré comme une position raisonnable. Il ne viendrait d'ailleurs à l'idée de personne de revendiquer la suppression de l'Ampère et de son remplacement par une unité composite à partir des trois unités primaires et des trois dimensions primitives associées. Dans la réforme du SI de novembre 2018, l'Ampère est défini comme un flux quantifié de charges élémentaires, les électrons ; or la structure de ces particules ne peut pas être décrites comme composites au contraire des autres particules élémentaires, et le concept de charge électrique ne trouve aucune justification dans les théories connues à ce jour, principalement en mécanique quantique et relativité. La nature de ces charges reste donc une question ouverte de la physique. De ce point de vue, nous pensons que l'Ampère, ou pour être plus précis un multiple de la charge de l'électron, devrait être également considéré comme une unité primaire même si effectivement la dimension de cette charge électrique peut s'exprimer comme une combinaison des trois dimensions primitives.

Le système d'unités de mesure internationale, actuellement utilisé par la grande majorité de la population mondiale, représente donc un compromis entre une certaine rationalité, apportée par la physique et les théories mathématiques qui lui sont attachées, et les réalités politiques industrielles et économiques du monde dans lequel nous vivons en ce début de 21ème siècle.

Choix du premier système international d'unités de mesure

À la fin du 18ème siècle, bien que l'électricité soit connue et étudier, au moins de façon empirique[29], le besoin d'une ou de plusieurs unités d'électricité ne se faisait pas sentir. L'étude de ces phénomènes restait du domaine de la simple curiosité intellectuelle sans réelle tentatives

[27] Maxwell, 1873, A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. 1 & 2, Clarendon Press, Oxford.
[28] Le transistor a été découvert Par Bardeen en 1950, découverte qui lui a valu le prix Nobel en
[29] Abbé Nollet, 1753, essai sur l'électricité des corps, 2 tomes, paris chez les frères Guerin

d'explications de leurs natures. Personne n'entrevoyait, à ce moment, une quelconque application de l'électricité dans le domaine industriel naissant. Il faudra attendre les premières applications pratiques[30] développées à partir de la révolution industrielle du 19ème siècle conduisant à de nouveaux marchés et à l'apparition du machinisme industriel[31] moderne pour que la définition d'une puis de deux unités électriques, l'Ampère et le voit, s'impose. Pas d'application industrielle, pas de demande économique, pas d'utilisation au quotidien par la population, il n'était donc ni utile ni nécessaire de définir une unité pour cette nouvelle classe de grandeurs. De cet exemple d'évolution, il ressort clairement que depuis fort longtemps, ce n'est majoritairement pas la science fondamentale qui a induit la demande de définitions d'unités de mesure, mais plutôt la pression de ceux qui travaillent au développement de la société, à son progrès technique, à la création de nouveaux outils, à l'émergence de nouvelles technologies conduisant à la naissance de nouveaux marchés.

La géométrie utilisée par les astronomes aurait pu conduire à un choix d'une unité plus grand que le mètre qui, lui, correspond plus à un usage au quotidien et à un emploi par la majorité des professions jusqu'au 20ème siècle. Mais le poids politique, industriel et économique de la société est et a toujours été l'élément dominant face à l'étude des lois de la nature. De même si l'on avait suivi la proposition de Stoney en 1881[32] de choisir un système d'unités indépendant de tout anthropocentrisme et lié aux seules quantités fondamentales de la nature estimées constantes, un système qui ne dépendrait que des constantes physiques c, G et e, on disposerait maintenant d'un système cohérent, répondant aux critères des théoriciens de la physique, aussi général que l'on pouvait l'estimer en cette fin du 19ème siècle, mais qui de par les valeurs numériques résultantes pour chacune des trois unités serait tout simplement inutilisable dans la vie quotidienne et aurait été rejeté par la population, les différentes composantes sociales de notre société.

Mais à l'inverse, les us et coutumes d'une société quels qu'elles soient ne peuvent à elles seules définir un système d'unités. C'est le jeu des échanges d'arguments, des impératifs économiques du moment, d'un compromis permanent entre intérêts politico-économiques et rigueur scientifique qui est et a toujours été recherché. La recherche permanente d'un accroissement de la précision dans la valeur numérique des unités est la conséquence des progrès technologiques et des demandes des industriels, tandis que la définition elle-même est le plus souvent initiée par les physiciens théoriciens, avec l'aide des métrologues qui vont lui donner un cadre pratique de faisabilité et de mise en pratique. Des échanges permanents entre utilisateurs finaux, agents économiques, métrologues et physiciens théoriciens sont nécessaires à l'avancement, et à l'évolution, du système international d'unités de mesure vers une définition à la fois physiquement plus cohérente, plus à l'image de notre compréhension de l'Univers, et plus simple d'utilisation pour chacune des parties.

Jusqu'à la révolution française, les seules unités nécessaires pour régler l'ensemble des problèmes liés à la vie courant, les échanges commerciaux et répondre aux questions scientifiques qui se posaient alors se résumaient à une courte liste : une unité de longueur, une unité de masse, une unité de durée et une unité de température ; les deux premières permettaient de répondre à toutes les taches de vie courante et à tous les échanges économiques, la troisième permettait, entre autre, de connaitre sa position en mer et donc de favoriser le commerce maritime ; quant à la dernière, elle était encore fort peu utilisée dans le quotidien[33] : la mesure

[30] Soulier A., 1916, Les Grandes applications de l'électricité, t. 2, Paris, Dunod (1re éd. 1896)

[31] Réalisation de la première ampoule électrique par Thomas edison en 1879, le prototype de la dynamo industrielle inventée en 1869 par Zénobe Gramme, en 1822, Peter Barlow construit la "roue de Barlow", une machine qui peut être considérée comme le premier moteur électrique de l'histoire.

[32] Johnstone Stoney G., 1881, on the physical units of nature, Philosophical Magazine 381

[33] Le point d'ébullition de l'eau se révélait en pratique suffisant dans les tâches quotidiennes ; ce n'est qu'avec le développement de l'industrie que le besoin d'une mesure de la température s'est développée, par exemple dans les domaines de la chimie ou de la métallurgie.

de cette grandeur était encore l'apanage du monde de la science. C'est au cours du 18ème siècle, après quelques égarements, comme l'existence d'une grandeur de chaleur particulière, le calorique[34], que le concept de température commença à être compris. La création de l'échelle de température de Fahrenheit en 1720 puis en 1741 celle de Celsius démontrent que les scientifiques de cette époque avaient compris que la température est un effet de l'énergie mécanique communiquée aux molécules d'une substance. Cette grandeur pouvait donc être écrite comme une fonction des trois premières unités de mesure que sont le mètre, le kilogramme et la seconde. Ces trois unités de mesure ont été qualifiées de primaires, et les autres unités comme la température, la pression ou l'énergie qui sont rattachées à ce groupe primaire constituent le groupe des unités secondaires ou unités dérivées.

Améliorer le fonctionnement économique d'un pays ou d'une région requérait d'abord la simplification et l'unification des différents systèmes d'unités de mesure existant antérieurement. Mais arriver à l'obtention d'un consensus de la population et obtenir l'adhésion du plus grand nombre de pays nécessitait plusieurs conditions préalables :

Un événement d'importance nationale permettant l'adhésion d'un peuple entier à un changement d'unités,

Un intérêt économique évident et acceptable par des populations diverses.

Ces deux conditions vont se trouver réunies à la faveur de la révolution française. C'est en effet à partir de cette époque, que va naître le premier système d'unités cohérent, le MKS (Mètre, Kilogramme, Seconde), qui va permettre la fédération de plusieurs nations autour d'un même intérêt : une plus grande liberté des échanges commerciaux et de données entre ingénieurs et scientifiques. De cette première version de système d'unités va naître, à partir de la seconde moitié du 20ème siècle, le futur système international, le MKSA, qui deviendra le système international, le SI avec ses sept unités.

Le succès du SI, qui a réussi à fédérer un grand nombre de pays, la quasi-totalité en pratique, s'explique par l'intérêt qu'il représente pour les échanges économiques et scientifiques, principalement ceux d'ordre technologique. Par exemple, dans l'industrie spatiale il est courant que l'organisme national qui pilote un projet de mission passe des appels d'offres conduisant à la signature de contrats de sous-traitantes locaux ou étrangers afin d'obtenir le meilleur de la technologie dans un domaine donné, avec le prix le plus concurrentiel. Les cahiers des charges inclus dans ces appels d'offres mentionnent toujours un certain nombre de caractéristiques obligatoires que devra remplir le module ou le dispositif réalisé par le sous-traitant. C'est là que le système d'unités de mesure du SI représente un réel intérêt car il permet, d'une part aux organisateurs de l'appel d'offres de s'adresser au plus grand nombre de sociétés de par le monde, et d'autre part de s'assurer que la précision des données numériques décrivant les solutions proposées pourront être facilement comparables sur une même base de comparaison. Le revers est que l'établissement de ces données dans les unités du SI doit être impérativement vérifié : on se souvient, par exemple, de l'accident survenu sur une mission spatiale, « Mars climate orbiter » en 1999, survenu suite aux spécifications de programmation prescrites au sous-traitant retenu mais qui avaient oublié de préciser que les valeurs écrites dans son document d'utilisation était données en unités Anglo-Saxonnes, pas en unités de mesure du SI ; la conséquence fut la perte du module d'exploration et une perte financière colossale : plus de cent vingt-cinq millions de dollars.

Cette multiplicité de signataires à la convention régissant l'adoption du SI sous-entend également une grande variété d'opinions et d'intérêts particuliers, certains pouvant se révéler contradictoires : les sujets d'étude des chimistes vont fortement différer de ceux des informaticiens et des physiciens mais se rapprocher, dans une certaine mesure, de ceux de la communauté des biologistes.

[34] Desray J., 1801, essais sur le calorique, Paris Desray

Ainsi les groupes d'influence vont être multiples dans les choix des évolutions des systèmes d'unités de mesure choisis, donc du SI, et en particulier dans l'élaboration de nouvelles définitions ou la décision d'ajout ou de suppression d'une unité. Dans le contexte économique hérité du 20ème siècle, les chimistes, et maintenant les biologistes, représentent de fait une majorité d'opinion. Or, par exemple pour ces derniers, il est très utile de disposer d'unités telles que la mole, le Kelvin, quand la candela sera, elle, nécessaire pour les ingénieurs du domaine industriel de l'éclairage ou les chercheurs qui utilisent la lumière pour des mesures spectroscopiques. Alors pourquoi vouloir encore simplifier le Si et le réduire aux trois unités de mesure qui semblent aujourd'hui nécessaires et suffisantes au regard des deux grandes théoriques physiques, la relativité et la mécanique quantique, qui fournissent une représentation aujourd'hui satisfaisante du monde, de notre Univers. Cette simplification est bien sûr voulue et demandée par les théoriciens, mais totalement refusée par le monde économique et industriel pour des raisons d'habitudes, d'outillages d'instrumentation existants, de contraintes juridiques liés aux nombreux contrats en cours et surtout pour des raisons financières, la métrologie pouvant se révéler un argument concurrentiel important, voire une arme commerciale.

une des conséquences de cette divergence d'intérêts est d'amener à préciser quelque peu les objectifs de la métrologie : elle n'a pas pour unique finalité de produire un système d'unités de mesure le plus simple et le plus représentatif de la compréhension de notre réalité, mais celle de fournir aux acteurs, tant économiques qu'industriels et Universitaires, un outil simple et performant, adapté au monde actuel, en adéquation avec les attentes de la communauté des théoriciens de la physique mais aussi des ingénieurs et tous ceux dont la mission est de concevoir et produire des objets utilisant les technologies émergentes. La mission de la métrologie est également de trouver un consensus sur le système de mesure le plus adapté à un instant donné dans un contexte à la fois scientifique, économique et sociétal.

Pourtant, on pourrait penser qu'une simplification du système d'unités de mesure devrait conduire à une simplification des modèles mathématiques qui servent de supports aux grandes théories descriptives de notre réalité comme le sont la relativité, la physique statistique et la mécanique quantique. Mais ce serait oublié le poids du monde économique et industriel : tout changement dans le système des unités de mesure aura un important impact financier d'une part sur la production et la commercialisation de tous les appareils de mesure fabriqués dans le monde, et d'autre part dans le monde économique et financier.

Supposons qu'une unité de mesure soit modifiée dans le SI, par exemple le mètre ; outre les appareils de mesure, utilisant directement ou indirectement cette unité, qui devront être retirés de la vente, reconçus et refabriqués, tous les logiciels techniques ou financiers qui utilisent cette unité et ses dérivées devront faire l'objet de corrections, de mises à jour, induisant un coût global financier pouvant se révéler très important. Une grande partie des fonds utilisés par les organismes de métrologie provenant du monde économique ou financier, une telle décision de modification devra faire l'objet d'une analyse d'opportunité détaillée, évaluant les avantages et inconvénients ainsi que les coûts induits, avant d'être acceptée. Le temps nécessaire à cette modification va être d'autant plus grand que le nombre de participants à l'évolution du SI est important et que la société civile est impliquée dans ce changement. C'est ainsi qu'il est courant en métrologie de constater des périodes de temps de plusieurs dizaines d'années avant l'adoption finale d'une modification ou la redéfinition d'une unité de mesure. L'exemple de la redéfinition du kilogramme constitue de ce point de vue un excellent exemple du temps nécessaire à la mise en œuvre d'une réforme considérée comme nécessaire depuis fort longtemps : plus de deux siècles pour faire évoluer cette unité.

Un système d'unités de mesure tel que celui que nous utilisons aujourd'hui est purement conventionnel et le choix des grandeurs utilisées comme base de ces unités est contingent ; il est entièrement dépendant des évolutions de la société par laquelle il est adopté, de ses modes de fonctionnement tant économiques que politiques. D'une manière souvent invisible, mais

toujours présente, l'organisation de notre société interagit fortement sur l'évolution des représentations de la nature que nous élaborons à l'aide des théories physiques qui reposent sur la nature et la définition de ces unités de mesure.

Évolution des trois unités primaires

Les bases du système métrique international actuel, le SI, ont été introduites et formalisées pour la première fois sous la révolution française, qui par une loi du 10 décembre 1799 a fixé la définition du kilogramme ainsi que celle du mètre. Mais il fallut attendre le 4 juillet 1837 pour que soit votée la loi rendant obligatoire l'usage de ce système d'unités en abolissant les innombrables anciennes unités de mesure qui avaient continué à perdurer jusque-là. La raison de ce très long délai : une grande réticence par la société civile à ce changement d'unités, et par voie de conséquence, de la modification des habitudes dans les actes de la vie courante ! Un système d'unités de mesure ne peut se concevoir sans une interaction avec les différentes composantes de la société qui le conçoivent et vont en être les principaux utilisateurs. En ce début de 19ème siècle, vont se confronter les réalités quotidiennes d'une population ouvrière[35], dont l'avenir matériel est loin d'être assuré, et l'effervescence d'une industrie en devenir, qui se structure et se développe à un rythme très rapide. Dans cette confrontation, le rapport de force penche vers les industriels soutenus par les progrès scientifiques[36] qui leurs procurent de nouvelles technologies adaptées à leurs besoins.

Pour répondre à ce pragmatisme industriel et aux progrès scientifique, notamment en physique, l'unité de distance, le mètre, est définie comme la dix millionièmes parties du quart du méridien terrestre, et une représentation destinée à servir d'étalon de référence, à remplacer ceux existant fabriqués en pierre et peu précis, est fabriquée en platine et déposée pour conservation aux archives nationales. En réalisant cet artefact, sensé matérialiser le plus exactement possible cette longueur unité, cet objet rompt avec sa définition : les erreurs, relatives inhérentes au processus de fabrication, qui lui sont attachées ne sont pas en relation avec la définition du mètre. Elles ne sont dues qu'aux limites de la technologie de l'époque et au savoir en matière de chimie, de métallurgie, mises en œuvre pour en assurer l'intégrité au fil du temps. Ainsi si la définition du mètre pouvait sembler reposer entièrement sur un objet indépendant de l'homme, donc dans une certaine mesure représentant un absolu, sa concrétisation dans un artefact le ramenait à une unité de mesure contingente puisqu'entièrement dépendante de choix humains en termes de technologies, de compositions, de procédures de comparaison avec les copies diffusées et de conservations. Toute matérialisation d'une unité de mesure par la production d'un artefact entraine une contingence de l'unité s'y rapportant. Les dispositifs de mesure utilisés pour la réalisation de cet artefact ne pouvant ne pouvant conduire qu'à une précision limitée, la valeur de l'incertitude dépendant partiellement du choix de la technologie utilisée et de la procédure suivie pour cette mesure, elle ne peut prétendre à être absolue.

Quant au kilogramme, il fut défini à cette même époque comme la masse d'eau pure d'un volume d'un décimètre cube à la température de la glace fondante[37], puis, au cours de cette même année 1795, la température de ce volume d'eau fut portée à 4°C[38] en constatant que c'est à cette température, et non à 0°C, que l'eau présente son plus faible gradient de dilatation ;

[35] Zola E., 2017, Germinal, classiques Hatier

[36] Encyclopédie de la Pléiade, 1963, Histoire de la science, NRF, pp. 893-977

[37] Décret du 18 Germinal, an 3, 7 avril 1795, Décret relatif aux poids et mesures (1, Bull. 135, n°749 ; B. 53, 114)

[38] Cité par Uzan J.-P., 2005, Les constantes fondamentales, Belin, P. 29

Enfin, en 1799[39] sous la forme d'un artefact en platine qui sera confié au Corps Législatif par l'Institut National des Sciences et des Arts.

L'unité de mesure des masses, matérialisée par cet artefact du kilogramme également en platine comme celui du mètre, est-elle aussi nécessairement contingente.

Les bases du système métrique ainsi constituées, se faisant l'écho d'une même préoccupation industrielle et commerciale, vont rencontrer immédiatement un succès international : le système métrique va être adopté rapidement d'abord par les Pays-Bas, la Grèce, l'Espagne, l'Italie, l'Allemagne, les États Unis et le Canada qui ont y voir un même intérêt pour les échanges internationaux. Une telle unification des systèmes de mesure de nombreux pays permettait en effet une rationalisation des productions industrielles et procurait ainsi un avantage concurrentiel aux industriels les plus importants des pays signataires en leur permettant d'étendre leur domination commerciale.

La seconde, elle, n'est pas modifiée à cette époque car déjà reconnue depuis longtemps comme une unité de mesure universelle, nécessaire à l'essentiel des pays occidentaux. La faible précision de sa définition, celle d'une fraction de la durée d'une journée solaire, étant néanmoins considérée comme compatible avec les besoins technologiques de cette fin du 18ème siècle, nul n'éprouve le besoin de changer de définition. Le premier système d'unités unifiées et simplifiées se contente de ratifier cette définition astronomique. L'unité de durée est donc, depuis le début de l'existence du système international d'unités de mesure, la seule qui repose sur une définition abstraite, une procédure de mesure de type astronomique permettant à chacun de calibrer ses propres horloges sans faire référence à un artefact enfermé en un lieu défini.

À la fin du 19ème siècle les sciences avaient faits d'importants progrès : la chimie[40] avait suffisamment progressé pour permettre de réaliser des analyses quantitatives de plus en plus précises ; par exemple, la théorie atomique introduite par Dalton[41] en 1803 avait conduit à la reconnaissance de grandeurs comme l'atome et les molécules en tant que groupement d'atomes. Cette découverte va permettre la définition du poids atomique qui deviendra par la suite la mole, définie comme la masse d'un nombre de molécules égale à celui d'atomes contenu dans 12 grammes de carbones ; en 1811, Avogadro[42] publie sa théorie qui soutient que le nombre d'atomes ou de molécules dans un même volume et dans des conditions environnementales égales, un volume de gaz contient le même nombre de molécules quel que soit la composition de celui-ci. Ce nombre sera en 1873 déterminé par Van der Waals à une valeur approximative de 6,2 10^{23}.

L'instrumentation en physique avait également, au cours de cette période, grandement progressée conduisant à un accroissement dans la précision des mesures faites. Par exemple les techniques d'interférométrie étaient suffisamment développées pour permettre des mesures très précises comme en témoigne l'expérience de Michelson et Morley[43] en 1887 pour tenter de mesurer la vitesse de déplacement de l'éther par rapport à la vitesse de rotation de la Terre. Ces techniques optiques atteignaient à cette époque un degré de précision tel qu'il devenait possible d'envisager une mesure de la longueur du mètre étalon par une méthode dérivée de celle mise au point par Michelson et donc d'attendre de tout processus de mesure une précision compatible avec cette technologie. Ainsi même si le résultat physique de l'expérience de Michelson fut négatif, le dispositif expérimental qu'il développa constituait un réel progrès des techniques

[39] Loi du 19 Frimaire, an 8, 10 décembre 1799, Loi qui fixe définitivement la valeur du mètre et du kilogramme (2, Bull. 334, n° 3456)

[40] Lecourt D. (dir.), 2006, Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences (1999), 4e réed. «Quadrige»/PUF

[41] Fernandez B., 2006, De l'atome au noyau : Une approche historique de la physique atomique et de la physique nucléaire, Ellipses, partie II, chap. 1

[42] Avogadro, Amedeo, 1811, "Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons". Journal de Physique. 73: 58–76

[43] A. A. Michelson and E.W. Morley, 1887, Philos. Mag. S.5, 24(151): 449-463

d'interférométrie[44] qui aura de nombreuses conséquences non seulement dans le domaine de la métrologie mais aussi dans le développement de ce qui constituera la spectroscopie[45], technologie qui sera proposée et utilisée comme l'une des possibilités pour la redéfinition de l'unité de masse, le kilogramme, en novembre 2018[46].

En 1889, la première réunion du CGPM[47] (Comité Général des Poids et Mesures) a modifié la procédure de réalisation de l'étalon matériel du mètre et du kilogramme afin de limiter les dérives constatées en fonction des conditions environnementales : le mètre de référence est fabriqué à partir d'une barre en platine iridié de façon à limiter au maximum les fluctuations thermiques, les problèmes de corrosion et la pollution de l'air ambiant. La précision de mesure est estimée alors à 0,01 mm. Les étalons représentant le mètre et le kilogramme sont déposés au pavillon de Breteuil à Sèvres dans les locaux de l'actuel B.I.P.M. (Bureau International des Poids et Mesures). Cette première réunion du CGPM entérine plusieurs décisions importantes :

« le Compte rendu du Président du Comité international et le « Rapport du Comité international des poids et mesures », d'où il résulte que, par les soins communs de la Section française de la Commission internationale du Mètre, et du Comité international des poids et mesures, les déterminations métrologiques fondamentales des prototypes internationaux et nationaux du mètre et du kilogramme ont été exécutées dans toutes les conditions de garantie et de précision que comporte l'état actuel de la science ;

Que les prototypes internationaux et nationaux du mètre et du kilogramme sont formés de platine allié à 10 pour 100 d'iridium, à 0,0001 près ;

L'identité de longueur du Mètre et l'identité de la masse du Kilogramme internationaux avec la longueur du Mètre et la masse du Kilogramme déposés aux Archives de France ;

Que les équations des Mètres nationaux, par rapport au Mètre international, sont renfermées dans la limite de 0,01 millimètre et que ces équations reposent sur une échelle thermométrique à hydrogène qu'il est toujours possible de reproduire, à cause de la permanence de l'état de ce corps, en se plaçant dans des conditions identiques ;

Que les équations des Kilogrammes nationaux, par rapport au Kilogramme international, sont renfermées dans la limite de 1 milligramme ;

Que le Mètre et le Kilogramme internationaux et que les Mètres et les Kilogrammes nationaux remplissent les conditions exigées par la Convention du Mètre ;

Sanctionne :

En ce qui concerne les prototypes internationaux :

Le Prototype du mètre choisi par le Comité international. Ce prototype représentera désormais, à la température de la glace fondante, l'unité métrique de longueur.

Le Prototype du kilogramme adopté par le Comité international. Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.

L'échelle thermométrique centigrade à hydrogène par rapport à laquelle les équations des Mètres prototypes ont été établies.

En ce qui concerne les prototypes nationaux :

Les mètres en platine iridié, dont les équations, par rapport au prototype international, sont renfermés dans la limite de 0,01 millimètre, avec une erreur probable ne dépassant pas ± 0,0002 millimètre.

---

[44] Le principe d'un Interféromètre de Michelson est de diviser le faisceau de lumière incidente en deux, puis de déphaser un des faisceaux, et de les faire interférer sur un plan optique.

[45] L'objet de la spectroscopie est d'identifier, et de mesurer les ondes électromagnétiques émises par les atomes ou molécules complexes soumis à un excitation par un apport préalable d'énergie externe, par exemple sous la forme de photons ou d'agitation thermique.

[46] Résolutions du CGPM de novembre 2018

[47] Comptes rendus du 1er CGPM (1889), 1890, 34

Les kilogrammes en platine iridié, dont les équations sont renfermées dans la limite de 1 milligramme, avec une erreur probable ne dépassant pas 0,005 milligramme.

En ce qui concerne les équations des prototypes nationaux :

Les équations des prototypes nationaux, telles qu'elles ont été déterminées au Bureau international, sous la direction du Comité international, et inscrites dans le Rapport de ce Comité et sur les certificats accompagnant ces prototypes. »

Les définitions des étalons de longueur et de masse, et leurs précisions très limitées, bien que non reconnues par l'ensemble des pays du monde occidental, semblaient suffisantes au regard des développements technologiques et des besoins des différents acteurs du domaine industriel de cette fin de siècle : la simplification des échanges économiques et des communications entre scientifiques présentait un intérêt suffisant pour satisfaire chacun. Cependant, en 1860, l'on constata qu'il était pratiquement impossible de raccorder les relevés géodésiques réalisés dans plusieurs pays européens dont certains n'étaient pas signataires[48]. Il était donc urgent de généraliser la définition du mètre et plus généralement d'unifier plus largement les unités de mesure utilisées. C'est ainsi qu'il fut proposé lors de la conférence géodésique internationale de 1867 d'adopter le mètre comme unité unique. Suite à cette conférence une commission internationale du mètre fut créée et entraîna en 1875 l'adhésion de 18 nouveaux pays à la reconnaissance du mètre comme unité de longueur. Le bureau international des poids et mesure (BIPM) naquit de cette reconnaissance. Suite à cette unification, en 1889, lors de la 7ème CGPM, la définition du mètre étalon est modifiée par l'adjonction de précisions sur les conditions expérimentales de la procédure de mesure de ce mètre étalon :

« *L'unité de longueur est le mètre défini par la distance, à 0°C, des axes des deux traits médians tracés sur la barre en platine iridié déposée au Bureau international des poids et mesures, cette règle étant soumise à la pression atmosphérique normale et supportée par deux rouleaux d'au moins un centimètre de diamètre situés symétriquement dans un même plan horizontal et à la distance de 571 mm l'un de l'autre* ».

Il ne s'agit donc pas d'une remise en cause à proprement parlé de la définition du mètre, qui reste un artefact matériel, comme le kilogramme, mais plutôt de l'adjonction de commentaires afin de s'assurer que les différentes sources d'erreurs constatées empiriquement lors des mesures réalisées sur l'étalon de longueur, déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres, seraient minimales et facilement identifiables. On se rendit alors compte que, malgré la multiplication de ces précautions, l'artefact lui-même conduisait à une limite pratique de précision. Par ailleurs, entre l'étalon de référence et les copies il a été également constaté l'existence d'écarts divergents dont certaines causes étaient identifiables, par exemple des différences d'environnements atmosphériques (humidité, polluants divers, température, …), quand d'autres restaient mal comprises.

Si le système de mesure ainsi défini répondait à cet instant aux attentes fortes du monde industriel et de la société civile, des voix se sont élevées parmi les physiciens théoriciens pour pointer du doigt les problèmes qu'un tel système d'unités de mesure posait. Ainsi, Maxwell, dans son discours pour la présidence à la British Association for the développement of science, fut le premier à douter de l'efficacité d'un système de mesure reposant uniquement sur des objets devant être matérialisés. Il critiqua fortement les unités du kilogramme et du mètre qui reposaient sur des étalons matériels sujets selon lui à de trop nombreux problèmes. Pour lui il était évident que de tels objets, d'une part ne pouvaient rester immuables au cours du temps, et d'autre part les copies qui en étaient faites présentaient dès leurs fabrications des écarts significatifs avec l'étalon officiel ainsi que des dérives a priori différentes de celles subies par l'étalon principal soumis à un environnement différent des copies :

[48] L'écart constaté provenait en grande partie des unités utilisées dans ces pays non signataires et leur conversion dans le système métrique.

« Car après tout, si les dimensions de notre Terre et sa durée de rotation sont très stables par rapport à nos moyens actuels de comparaisons, elles ne le sont pas sous l'effet d'une quelconque nécessité physique La Terre pourrait se contracter en se refroidissant, ou prendre du volume avec l'arrivée de météorites, sa vitesse de rotation se réduire légèrement, et elle serait toujours la même planète. Mais une molécule, disons celle d'hydrogène, si sa masse ou son temps de vibration venaient à changer un tant soit peu, ne serait plus une molécule d'hydrogène. Donc, si nous voulons obtenir des standards de longueur, de temps et de masse qui soient absolument permanents, nous ne devons pas les chercher dans les dimensions, le mouvement ou la masse de notre planète mais dans la longueur d'onde, la période de vibration et la masse absolue de ces molécules parfaitement similaires, qui sont à la fois impérissables et inaltérables [c'est-à-dire les atomes"] »[49].

Maxwell suggérait que les étalons pour ces deux unités, le mètre et le kilogramme, soient définis à partir de grandeurs fondamentales qu'il jugeait invariables quel que soit l'environnement dans lequel la mesure s'effectue ; Maxwell avait à l'esprit, à cette époque, les propriétés de l'atome d'hydrogène qui présentait une remarquable stabilité dans ses caractéristiques indépendamment du lieu, de l'instant et des conditions d'environnements. L'idée était bien évidemment de pouvoir mesurer la longueur d'onde d'une raie particulière d'un atome donné, le plus simple et donc a priori le plus adapté étant l'hydrogène. Si cette longueur d'onde pouvait être définie avec une précision suffisante, alors le mètre pourrait être défini comme un multiple de cette dernière. Mais comment définir alors l'unité de masse, le kilogramme, Maxwell restait prudemment silencieux sur ce point. Il pensait certainement à l'utilisation de la masse d'un atome d'hydrogène qui lui aussi présentait la stabilité nécessaire à son utilisation comme base de référence pour la définition du kilogramme.

Mais les mentalités n'étaient pas prêtes pour un tel changement de références, et surtout les intérêts de la société civile et du monde des affaires convergeaient vers une plus grande efficacité, une stabilité et une simplicité d'utilisation, le degré de précision obtenu à partir de ces étalons matériels étant à cette époque largement suffisant. Pourquoi alors réaliser un changement majeur de définition qui ne manquerait pas d'entraîner des coûts de diffusion et d'adaptation du monde des affaires ? Peut-être un rejet de la société. L'objet de référence, le mètre en platine iridié, présentait toutes les caractéristiques suffisantes aux transactions commerciales et donc financières. Par ailleurs définir les unités primaires à partir des caractéristiques de l'hydrogène conduisait à utiliser une unité de référence tout à fait en dehors de la perception naturelle de l'homme : un atome d'hydrogène ainsi que les longueurs d'ondes émises par lui lors d'excitation électromagnétiques sont de l'ordre de l'Angstrom, dix milliards de fois plus petit que l'unité du mètre adopté enfin par l'ensemble de la population. Pour toutes ces bonnes raisons, le monde économique et industriel rejeta globalement l'idée d'un si profond changement, le repoussant à une date ultérieure non fixée.

Entre temps, en 1832, Gauss réussit à convaincre la communauté scientifique que l'unité de la seconde devait être associée à celles du mètre et du kilogramme, qu'elle devait rejoindre le groupe des unités primaires. Mais cette unité ne fut officiellement inscrite dans la liste des unités reconnues par l'ensemble des pays signataires de la convention relatives à l'adoption d'un système commun d'unités de mesure qu'en 1889. Ce très long intervalle de temps entre l'énoncé d'une proposition et sa réalisation est courant dans l'histoire de la métrologie : une des principales raisons de ce « temps long » est d'abord la nécessité de faire admettre une nouvelle définition par les divers membres de la communauté du SI, de trouver le bon compromis entre les technologies disponibles et accessibles par les différents pays membres, et ensuite le délai nécessaire pour se trouver dans une conjecture politico-économique favorable à cette prise de décision. Dans le cas de la seconde, la principale difficulté consistait à se mettre

[49] J. C. Maxwell, 1870, presidential address to the British Association for the advancement of science, cite dans B. Petley, the fundamental physical constants and the frontier of measurement, Bristol, Adam Hilger, 1985, p. 15

d'accord sur une définition acceptable par toutes les parties. La solution qui fut finalement trouvée consistait à donner une définition présentant suffisamment de souplesse afin qu'elle puisse être adaptée, voire corrigée, par un comité d'experts, les astronomes, physiciens considérés comme impartiaux.

La seconde était en effet définie à partir de données astronomiques. Cette unité avait été introduite en tant que la durée correspondant à 1/86400 de la durée moyenne du jour solaire, celle calculée sur une année. L'introduction dans la définition du concept de « jour moyen » introduisait une grande difficulté de mesure et donc une incertitude importante sur le résultat obtenu. Mais le rattachement à un phénomène astronomique était un premier pas vers l'abandon des références anthropocentriques et une première tentative de la définition des unités par l'intermédiaire de lois de la physique jugées intemporelles.

Durant la même période, Sous l'impulsion de J. C. Maxwell, W. Weber et C. F. Gauss, le premier système d'unités comportant des unités de base et des unités dérivées était créé en 1874. C'est le système CGS (centimètre-gramme-seconde). Ce système jugé peu pratique par les divers utilisateurs, car se révélant inapproprié pour décrire les phénomènes électromagnétiques, va être néanmoins étendu par adjonction de l'Ohm, du Volt et de l'Ampère.

C'est au cours de sa réunion de 1873, que la « *British association for the development of science* » avait décidé de relier les grandeurs électriques aux trois unités principales que sont le mètre, le kilogramme et la seconde. Ainsi naissait le système CGS qui était un système d'unités électriques juxtaposé, mais non incorporé au système international de l'époque. Bien qu'adaptés aux mesures en électromagnétisme, le centimètre et le gramme vont être remplacés par le kilogramme et le mètre ; ce fut l'acte de naissance du système MKS.

Giorgi, en 1901, montra qu'il était possible d'étendre ce système de mesure pour le rendre aptes aux mesures de type électromagnétiques par adjonction d'une nouvelle unité principale, l'Ampère, conduisant ainsi au système d'unités M.K.S.A. (mètre-kilogramme-seconde-ampère). Bien que définies en 1908 lors de la conférence internationale des unités de mesure à Londres, ce n'est que lors du 9ème CGPM, en 1948, que les unités de mesure électromagnétiques vont être officiellement ajoutées au SI. Il fallait en effet pour faire admettre cette modification recueillir à la fois un avis favorable de la Grande Bretagne et de la France. Les conditions favorables à ce type de compromis ne furent réunies qu'au sortir de la seconde guerre mondiale où il était nécessaire de faire bouger les diverses positions afin de reconstruire les deux pays et de relancer leurs économies.

Ce système maintenant connu sous l'abréviation de SI (système international) comporte à ce jour 7 unités principales et 17 unités dérivées. Si l'on observe de plus près ce système d'unités, on y retrouve toujours une forte empreinte du monde politique, de l'économie et du pragmatisme industriel : sur les sept unités de mesure proposées comme principales, trois sont en fait des unités de mesure dérivées (la candela, le kelvin et la mole), seul le mètre, le kilogramme et la seconde, auquel il faut adjoindre selon nous l'Ampère, sont à proprement parlé de réelles unités de base. Comme nous l'avons déjà expliqué plus haut, il est possible d'exprimer quatre unités du système international (la mole, le kelvin, l'Ampère et la candela) en fonction des trois unités qualifiées de primaires que sont le mètre, le kilogramme et la seconde. Nous allons revenir un peu plus loin sur ce concept d'unités primaires et d'unités dérivées.

Évolution de la définition de la seconde

Si les trois grandeurs primaires, les masses, les distances et les durées étaient déjà mesurées par des unités depuis la haute antiquité, l'unité de mesure des durées était la seule pour laquelle toute référence à un quelconque artefact était inenvisageable. Elle devait donc être définie à partir de l'évolution d'un système naturel présentant une régularité prouvée. Le temps est en effet une grandeur immatérielle, dont la nature reste toujours incomprise, non mesurable au

contraire des durées. De ce fait l'unité de mesure des durées ne peut se réduire à la comparaison avec un artefact. C'est ainsi que très tôt les hommes ont cherché à rattacher la mesure de cette grandeur à la seule référence qui leur était accessible : la science astronomique, et plus précisément le cycle des journées, des saisons et des années. Que cette unité soit définie par rapport à la durée d'une journée solaire ou par référence avec une durée plus complexe mais plus stable, n'était pas un pur hasard : il n'était pas possible jusqu'à une date récente de se référer à une autre grandeur. Mais la difficulté à mettre en pratique une telle référence astronomique va rapidement conduire l'homme à utiliser un système mécanique assez régulier pour répondre aux demandes diverses de la société civile : c'est l'utilisation du pendule et de ses nombreux perfectionnements apportés par la science horlogère comme par exemple le régulateur à échappement[50] inventée, dans une première version, en Chine par Yi Xing en 725. L'introduction de ce perfectionnement en Europe remonte à 1283 mais il faudra attendre 1715 et l'invention du mécanisme à ancre par George Graham pour que les technologies horlogères soient généralisées en métrologie. Les développements technologiques ultérieurs vont perfectionne les dispositifs mécaniques utilisés jusqu'au milieu du 20ème siècle où l'électronique et l'invention des régulateurs à quartz vont remplacer les dispositifs mécaniques de mesure des durées. Ce n'est que dans le courant du 20ème siècle que l'unité des durées, la seconde, trouvera sa définition actuelle, le temps de vol d'un photon dans le vide.

On peut s'interroger sur l'absence de l'unité de mesure des durées, la seconde, dans cette redéfinition et cette simplification de ce premier système de mesure adopté en 1799 et mis en pratique en 1837. La raison en est selon nous que, bien avant cette date, tous les états occidentaux avaient de fait déjà reconnu la seconde comme unité de temps, même si les moyens de mesurer cette unité pouvaient présenter des écarts technologiques importants. La mesure de la seconde à cette époque était un enjeu important pour le trafic maritime, la maîtrise des mers, et donc pour les échanges commerciaux avec les colonies établies ou les terres découvertes. Il était de peu d'intérêt de découvrir de nouvelles contrées si l'on n'était pas capable de les situer sur une carte et surtout d'y revenir ultérieurement pour établir des relations durables économiquement et politiquement. Une autre raison est que l'unité de durée, la seconde, est une grandeur dynamique, fort différentes de toutes les autres grandeurs qui composent notre Univers ; on ne peut l'arrêter pour la mesurer ; cette grandeur qui nous apparaît comme abstraite, sa nature nous échappe bien que plusieurs philosophes[51] aient tenté de la définir. Cette difficulté à comprendre la nature du temps, ou plus exactement de la durée n'est pas unique : la nature de l'unité de longueur rencontre également de grandes difficultés. Nous reviendrons sur cette question de la nature des unités de temps, de masse et de longueur dans le chapitre 4.

Néanmoins, tous les dispositifs, et ceux utilisés jusqu'au début du 20ème siècle pour la mesure du temps, reposaient sur le principe du balancier qui était supposé battre précisément la seconde définie par rapport aux observations astronomiques. Déjà en 1271 le philosophe et savant Robertus Anglicus[52] écrivait :

« Les horlogers essaient de fabriquer une roue qui tournera exactement selon le cercle équinoxial ».

Si, encore aujourd'hui, l'on ne connaît pas précisément l'inventeur en Europe de l'horloge mécanique, on constate que les premiers exemplaires apparaissent dès la fin du 13ème siècle en Angleterre, par exemple dans la cathédrale d'Exeter et la cathédrale St Paul à Londres. À cette époque l'unité de durée était déjà la seconde ; elle était définie comme une fraction du jour solaire, l'intervalle de temps s'écoulant entre deux passages au zénith du soleil, divisé, lui, en

[50] Berthoud F., 1802, Histoire de la mesure du temps par les horloges, t. 1, Paris, Imprimerie de la République

[51] Saint Augustin, 1838, Les confessions en treize livres, trad. du latin de M. Léonce de Saporta, in : Chefsd'œuvre des pères de l'Eglise, t. 12, ch. 14 p. 453.

[52] Anglicus B., 1240, De proprietatibus rerum, traduction de Jean Corbechon en 1372 sous le titre le proriétaire des choses, Bibliothèque mazarine cote 181 (Postilles) 849 (4e livre des Sentences)

24 heures d'une durée de 60 mn ou 3600 secondes. Le problème était bien sûr que cette seconde était peu précise car une définition faisant référence à la durée d'un jour solaire conduisait à une erreur sur la durée de cette journée, considérée sur un cycle annuel, d'environ une vingtaine de minutes. Cette erreur a pour origine d'une part l'inclinaison de la Terre sur son axe de rotation et d'autre part l'ellipticité de l'orbite circum solaire. Les savants de cette époque ne pouvaient pas savoir que l'orbite du soleil était elliptique, car pour eux c'était le soleil qui tournait autour de la Terre.

La compréhension de la forme de l'orbite terrestre et de l'oblicité de sa rotation ne sera acquise qu'après les travaux de Kepler suivi par ceux de Newton. Kepler[53] va montrer que les orbites sont a priori elliptiques et non circulaires, mais ce n'est qu'en 1838 que Bessel, astronome allemand, va avancer une preuve irréfutable du mouvement de l'ellipticité de l'orbite de la Terre autour du Soleil : en observant la position d'une étoile relativement proche de la Terre par rapport à celles qui l'entourent, il constate qu'elle décrit au cours d'une année une petite ellipse, ce qui ne peut être dû qu'au mouvement de la Terre autour du Soleil ; le mouvement de précession de la rotation de la Terre autour de son axe, découvert dès l'antiquité[54], ne sera lui calculé qu'au 13ème siècle par Nasr Eddin Tusi qui trouvera une valeur de 51″ par an, valeur très proche de celle admise aujourd'hui.

La mesure précise et l'explication mathématique avancées à partir du 19ème siècle de ces deux effets du mouvement de la Terre, responsables d'une variation annuelle significative de la durée d'un jour solaire, et la naissance de la mécanisation à partir de cette même époque, expliquent pourquoi jusqu'à cette date les utilisateurs des horloges n'éprouvaient pas la nécessité de redéfinir la seconde, d'améliorer la précision de sa définition.

Les précisions obtenues avec les horloges construites jusqu'au 17ème siècle, qui utilisaient un mécanisme à échappement rudimentaire, conduisaient à des erreurs du même ordre de grandeur que celles dues aux variations de la durée du jour solaire, et pouvaient être ainsi considérées comme acceptables.

Mais une telle imprécision ne permettait pas de déterminer la position précise d'un navire lors de longs voyages d'exploration au cours desquels il n'était pas possible de garder les cotes en vue. Le besoin d'un dispositif d'horlogerie plus précise se fit donc sentir dans les cercles de la marine marchande. Un prix fut même offert, au 18ème siècle, à celui qui permettrait de réaliser un dispositif permettant de faire le point au cours d'un long voyage maritime. C'est un horloger autodidacte qui y parvint le premier : John Harrison[55]. En 1734 il invente un nouveau type de chronomètre de marine, d'un poids de 32,5 kg qui obtient une fiabilité et une précision nettement accrues. En 1761, avec son prototype n°4, beaucoup plus petit et précis, il gagne le prix offert par le parlement britannique. Le vaisseau Deptford, commandé par James Cook et équipé de son chronomètre, effectue l'aller-retour entre la Grande-Bretagne et la Jamaïque avec une erreur de 1 minute et 54 secondes en 6 mois de traversée. En 1765, il perfectionne encore son invention : le chronomètre n°5 commet une erreur de 5,2 secondes seulement après une croisière de deux mois. Une telle précision dans les mouvements d'horlogerie permettait de mettre en évidence et de mesurer les variations du jour solaire ; Avec ce type d'horloge, la définition de la seconde n'était plus en accord avec la technologie et l'attente des acteurs

[53] Cette ellipticité des orbites héliocentriques de la Terre et des autres planètes du Système solaire a été découverte par Johannes Kepler (1571-1630), a partir des observations de l'orbite de la planète Mars. ... L'énoncé est connu comme la première loi de Kepler. ce fut Ératosthène (v. 276 - v.194 av. J.-C.) qui fut le premier à démontrer l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur3. Il établit sa valeur à 23°51'. Mais Pythéas avait, semble-t-il, déjà effectué ces calculs presque un siècle avant grâce à des mesures faites à Marseille et validées par l'observation du soleil de minuit au-delà du cercle polaire lors de son expédition vers 325 à 300 av. J.-C. L'astronome danois Tycho Brahe la détermina en 1587 à 23°30'30". Il la réévalua en 1590 à 23°29'46"5.

[54] On pense que ce phénomène a été découvert par l'astronome grec Hipparque, peu après l'an -150.

[55] Potter J. D., 1923, The Marine Chronometer. Its History and Development, London. Rééd. : London, 1971 ; reprint, Holland Press, London, 1976 ; reprint, Antique Collectors' Club Ltd, 2006.

économiques. Il devenait donc urgent d'adapter la définition de la seconde aux nouvelles connaissances et aux évolutions technologiques associées.

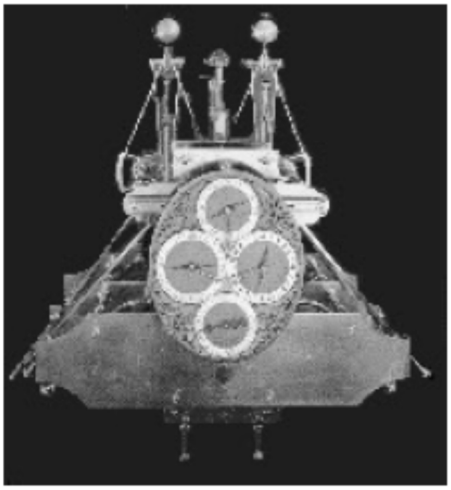

Figure 1 : L'horloge marine n°4 de Harrison

La 1ère CGPM de 1889, malgré ces progrès techniques dans la fabrication des horloges et ceux de l'astronomie, notamment les mesures de l'ellipticité de l'orbite terrestre et de l'angle d'inclinaison de son axe de rotation sur le plan de l'écliptique, étrangement ne va pas modifier cette définition de la seconde qui reste égale à 1/86.400 de la durée du jour solaire, et ne statut que pour les unités de masse et de longueur. Il faudra attendre 1956, soit presqu'un siècle plus tard, et une analyse théorique complète des éléments de dérive de la durée d'une année, pour une prise en compte des imperfections de la rotation de la Terre qui ralentit notamment à cause des marées générées par la Lune. La définition est alors modifiée comme la fraction 1⁄31 556 925,9747 de l'année tropique 1900. C'est la seconde du temps des éphémérides (TE).

Pourquoi a-t-il fallu attendre le milieu du 20ème siècle pour abandonner la référence à la durée d'une journée que l'on savait entachée de nombreuses erreurs dues à ses variations temporelles. La réponse est simple et en accord avec la domination du monde scientifique par le monde économique : il n'y avait pas de demande suffisamment forte du monde industriel pour justifier la mise en place d'une procédure de modification de la définition de la seconde. Le monde scientifique était déjà conscient de ce manque de précision, mais comme cela n'avait pas un impact technologique déterminant pour le monde industriel il était encore possible d'attendre. Les progrès de l'horlogerie de marine ne pouvaient pas être utilisés comme moyen de pression car, relevant plus d'un avantage concurrentiel, ils avaient plus intérêt à rester confidentiel.

La redéfinition de la seconde, reposant sur l'émission d'une onde lumineuse à une fréquence fixe pour un atome donné et une transition quantique définie, a constitué l'élément déclencheur d'une réaction en chaine, il a été un des premiers arguments conduisant les métrologues à une redéfinition de l'ensemble des autres unités à partir d'un choix de grandeurs facilement mesurables et stables, un jeu de constantes fondamentales permettant une stabilité de ces définitions sur une longue période de temps. La grande précision temporelle des unités espérée à partir de des seules constantes fondamentales était le garant, déterminant et suffisant pour les acteurs économiques industriels et métrologues, d'une période de stabilité leur permettant une rationalisation des productions et des coûts induits par tout système de mesure.

Ce n'est qu'en octobre 1960, lors de la 11ème CGPM[56] que cette définition de la seconde va être modifiée. Pour corriger l'erreur importante due à la référence du jour solaire, la nouvelle définition entérinée conserve la référence aux phénomènes astronomiques mais en utilisant un

[56] XIème CGPM, 11 – 20 octobre 1960, 9ème résolution : la seconde est définie par rapport à l'année tropique ; elle est définie comme la fraction 1/86400 du jour solaire moyen, ce qui autorise une précision de 10-7, site web du BIPM

phénomène dont on savait qu'il était plus régulier dans les résultats de sa mesure : La 9ème résolution énonce que la durée du jour solaire est remplacée par celle d'un jour moyen faisant référence à l'année tropique 1900, ce qui conduit à une précision théorique de 10^{-7} s.

Mais même cette modification se révèle encore largement insuffisante, et ce pour plusieurs raisons déjà connues en ce milieu du 20ème siècle :

L'apparition d'horloges à quartz un peu avant la seconde guerre mondiale, quartz qui vont être perfectionnés dans la première moitié du 20ème siècle, spécialement au cours de la seconde guerre mondiale,

La conception de la première horloge atomique dès 1947,

L'observation de petites variations de la durée de rotation de la Terre autour du soleil[57], sous l'action résultantes des autres planètes et de l'action des forces de marée engendrées par la Lune, qui introduisent une variation de la durée correspondant à une seconde,

Enfin, le développement des systèmes électroniques à hautes, puis très hautes fréquences[58], nécessitant un référentiel temporel avec un degré de précision incompatible avec une définition astronomique de l'unité de temps.

Alors, pourquoi n'a-t-on pas tenu compte de ces connaissances ? Là encore on peut raisonnablement avancer l'idée selon laquelle le changement dans les habitudes était trop important. Il aurait conduit à une trop importante perturbation dans la société civile et aurait engendré un trop grand bouleversement dans les différents domaines de l'industrie. Et puis quel phénomène était disponible à ce moment pour remplacer le temps solaire ? Les applications de la mécanique quantique en étaient encore à leurs prémisses.

La première horloge atomique est construite en 1947. Il s'agit d'une horloge à ammoniac. Mais, au regard des standards actuels, elle était peu performante : elle pouvait s'écarter de l'heure réelle d'une seconde en trente ans. En 1958, fut créée au Canada, la première horloge atomique utilisant le césium 133. Elle pouvait atteindre une précision de l'ordre de quelques millionièmes de seconde par an. Cette technologie est finalement adoptée en 1967 par la 13ème CGPM pour définir la seconde comme unité de base du système international :

« La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du césium 133. »[59]

Si les planètes ainsi que la Lune restaient stables sur leurs orbites, la période de rotation de la Terre autour du soleil serait constante. Mais les interactions de la Lune avec la Terre, les effets de marée, entraînent un ralentissement de la rotation de la Terre sur elle-même et une accélération de la Lune, donc un éloignement progressif mesuré d'environ 3,84 m par siècle[6061].

Dès les années 1930, l'utilisation de la propriété résonnante des quartz avait été utilisée pour stabiliser les oscillateurs électroniques, technologie ensuite largement utilisée dans les émetteurs-récepteurs radios, particulièrement pendant la seconde guerre mondiale. La nécessité industrielle, mais surtout militaire, de disposer de nombreux canaux de communications utilisables dans une bande de fréquences réduite avait poussé les industriels à l'amélioration des techniques de fabrication de ces quarts qui disposaient ainsi d'une meilleure précision et stabilité en fonction du temps et des paramètres d'environnement comme la température. La précision obtenue devenait comparable, voire meilleur, que celle de la définition de la seconde de cette époque. Encore une fois, la technologie avait dépassé la précision retenue pour la

[57] Danjon A., 1929, la rotation de la Terre, l'astronomie p. 115

[58] La fin des années 60 va voir se développer des technologies radio dans le domaine des hyperfréquences, c'est-à-dire à des fréquences voisines de 10^{10} Hz

[59] Résolution 1 de la 13ème CGPM d'octobre 1967

[60] Le changement de répartition de la matière au sein de la planète (modification des massifs montagneux, fonte de glaciers continentaux, disparition de grandes étendues d'eau) est également susceptible de modifier sa vitesse de rotation mais dans une moindre mesure

[61] La mesure de l'éloignement de la Lune par rapport à la Terre est mesurée par réflexion d'un faisceau laser sur un miroir déposé sur la surface de la Lune par les astronautes lors de la mission Apollo XI de 1969

définition de l'unité de durée. Les métrologues furent naturellement conduits à proposer une nouvelle définition qui prenait en compte ces nouvelles technologies disponibles, définition qui devait permettre un degré de précision suffisamment accru pour assurer une pérennité élevée de cette nouvelle définition. Selon les métrologues[62] une pérennité suffisante doit se compter en multiples d'une dizaine d'années.

Les premiers lasers[63] apparurent dans le début des années 1960. La technologie des lasers connut dans les années qui suivirent un rapide développement[64]. Ils gagnaient en stabilité de fréquence avec le temps et leur bruit propre, leurs fluctuations étaient fortement réduites. Ces progrès technologiques vont permettre une évolution dans la conception des horloges atomiques[65] qui vont également gagner en précision pour atteindre à la fin du 20ème siècle une précision voisine de 10^{-15}. C'est ainsi que la CGPM de juin 1968 va opérer un changement radical de définition et décider d'abandonner toutes références au domaine de l'astronomie ; elle précise dans sa première résolution :

« La seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la radiation entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium. »

La recommandation S2 du CIPM de 1970 apporte, elle, une précision importante sur la nature du temps international résultant de l'adoption de cette définition :

« Le Temps atomique international est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau international de l'heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système international d'unités. »

Puis, en 1975, afin de formaliser ces ajustements à la réalité du monde économique, la 15ème CGPM reprenant la recommandation du CIPM, énonce dans sa cinquième résolution :

« considérant que le système appelé Temps Universel coordonné » (UTC) est employé très largement, qu'il est diffusé par la plupart des émetteurs hertziens de signaux horaires, que sa diffusion fournit aux utilisateurs à la fois des fréquences étalons, le Temps atomique international et une approximation du Temps Universel (ou si l'on préfère, du temps solaire moyen), constate que ce Temps Universel coordonné est à la base du temps civil dont l'usage est légal dans la plupart des pays, estime que cet emploi est parfaitement recommandable. »[66]

L'abandon de la référence astronomique pour l'unité de temps au profit de grandeurs purement quantiques marque un tournant conceptuel fondamental dans la métrologie et correspond au début du processus qui conduira à la redéfinition complète du SI à partir des seules constantes fondamentales appartenant toutes sauf une, la constante c, au monde microscopique, monde décrit correctement jusqu'à maintenant par la mécanique quantique dans son interprétation dite standard, celle de l'école de Copenhague initiée par Bohr, Dirac et Heisenberg.

À ce point de l'évolution de l'unité de durée, revenons sur une importante question : pourquoi le constat de l'insuffisante de précision de la seconde définie à partir d'une loi astronomique a-t-il conduit les métrologues à se tourner naturellement vers les transitions

[62] Entretiens avec les métrologues du BIPM

[63] Kastler A., En 1950 met au point un procédé de pompage optique, qu'il valide expérimentalement, en 1952 avec Brossel et Winter. En 1953 le premier maser est conçu par J. P. Gordon, H. J. Zeiger et Ch. H. Townes ; Philippe Binant, « Introduction au laser. Du point de vue de la physique », La Lettre, n° 164, Commission Supérieure Technique, Paris, 2017, p. 9-13

[64] Hilton P. A., 2002, In the Beginning…, Int. Congrs on App on Application of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'2002), Scottdales, USA

[65] Les lasers vont permettre une mesure en temps réel de la vitesse des atomes utilisés dans les horloges atomiques et donc de tenir compte du facteur de correction introduit par l'effet Doppler associé. Ils vont par la suite être utilisés pour confiner ces atomes, les refroidir et ainsi disposer d'une source plus stable dans le temps ; c'est le début des horloges atomiques à fontaine.

[66] Comptes rendus de la 15e CGPM (1975), 1976, 104

électroniques, les sauts quantiques d'un atome particulier et pas vers une autre loi du corpus de la physique ?

Comme expliqué plus haut, à la fin des années 1970, les connaissances en astronomie montraient clairement que les observations des objets célestes ne pourraient conduire à améliorer la précision par rapport à la fraction de l'année tropique, l'astrophysique étant par nature une physique d'interactions mécaniques entre un nombre élevé de corps, donc un comportement qu'en partie prévisible. Il était ainsi nécessaire de se tourner vers une autre loi de la nature. Deux lois constituaient le socle de la connaissance en physique, et continue à le constituer aujourd'hui : les théories de la relativité et la mécanique quantique. À propos des aspects quantiques du monde microscopique, Einstein avait montré que :

« Le processus mis en jeu dans l'horloge, et plus généralement dans tout processus physique, se déroule d'autant plus vite que le potentiel de gravitation du lieu où il advient est plus grand... Or, il existe des "horloges" qui sont présentes en des lieux de potentiels gravitationnels différents et dont l'allure peut être suivie très précisément: ce sont les sources des raies spectrales... La lumière qui vient de la surface solaire, lumière émise par une source de ce type, possède une longueur d'onde supérieure d'environ 2 millionièmes à celle de la lumière émise sur la terre par des substances identiques. »[67]

De grands progrès avaient été réalisés en technologie d'analyse spectrale, sous la pression d'une part de la demande des laboratoires d'analyses en chimie et en pharmacie, et d'autre part par les études sur les rayonnements des étoiles dont le soleil. Le césium a d'ailleurs été détecté par spectroscopie en 1860 par Robert Wilhem Bunsen et Gustav Robert Kirchhoff lors d'une analyse de l'eau minérale de Dürkheim.

Les technologies mettant en jeu la lumière, comme par exemple les lasers étaient, comme nous l'avons dit, dans une phase de fort développement notamment vis-à-vis de la redéfinition du mètre. Parmi ces technologies, la spectroscopie avait gagné en précision : la technologie du refroidissement des atomes, initié par Kastler[68] et mis en œuvre par Hänsch & Schawlow[69] et Wine-land & Dehmelt[70] permettait d'atteindre des niveaux de précision jamais encore atteint ce qui permettait d'entrevoir leur utilisation dans la redéfinition de la seconde. La disponibilité et la maîtrise de cette technologie fut suffisante pour convaincre les métrologues d'adopter une définition fondée sur une raie particulière d'un atome judicieusement choisi ; mais quel atome choisir, pourquoi le césium 133 qui comporte 40 isotopes différents ? La réponse tient dans la caractéristique essentielle de l'atome choisi : il doit posséder une raie hyperfine de façon à pouvoir atteindre le niveau de précision espéré. Le césium 133 correspondait à ce critère, était assez abondant, facilement séparable des autres isotopes et était en outre assez simple à utiliser, donc peu onéreux.

En 1997, entre la 20ème et la 21ème CGPM, une précision est apportée à la définition de la seconde afin de tenir compte des difficultés techniques rencontrées mais surtout dans l'attente d'une amélioration significative de la précision des mesures de l'unité de temps : celle-ci explique que la définition de la seconde doit maintenant faire référence à un atome de césium au repos et à zéro degré Kelvin.

Finalement, en 2006, la CIPM dans sa première recommandation donne une liste de transitions électroniques qui présentent les caractéristiques nécessaires à leur utilisation dans la définition de l'unité de temps :

---

[67] Einstein, 1907, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronic IV p. 411-462 ; traduction française dans "Einstein Œuvres choisies" F. Balibar et al, Le Seuil (1999)

[68] Kastler, Alfred (1950), « Quelques suggestions concernant la production optique et la détection optique d'une inégalité de population des niveaux de quantification spatiale des atomes. Application à l'expérience de Stern et Gerlach et à la résonance magnétique », inJ. phys. radium11.6,pp. 255–265.

[69] Hänsch, T. W. & A. L. Schawlow (1975), « Cooling of gases by laser radiation », in Optics Comm.13, p. 68

[70] Wineland, D. J. & H. Dehmelt (1975), « Proposed10^{14} $\Delta\nu < \nu$ laser fluorescence spectroscopy on TI+ mono-ion oscillator III », in Bulletin of the Americal Physical Society 20, p. 637.

« Considérant qu'une liste commune de «valeurs recommandées des fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde » est à établir,

Que le Groupe de travail commun au Comité consultatif des longueurs (CCL) et au CCTF sur la mise en pratique de la définition du mètre et sur les représentations secondaires de la seconde, lors de sa réunion au Bureau international des poids et mesures (BIPM) en septembre 2005, a discuté des fréquences des radiations candidates potentielles en vue de leur inclusion dans la liste des représentations secondaires de la seconde,

Que le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF a examiné et mis à jour les valeurs des fréquences des transitions de l'ion de mercure (Hg), de l'ion de strontium (Sr), de l'ion d'ytterbium (Yb) et de l'atome neutre de strontium lors de sa session de septembre 2006,

Que le CCTF avait déjà recommandé dans sa Recommandation CCTF 1 (2004) la fréquence de la transition quantique hyperfine non perturbée de l'état fondamental de l'atome de 87Rb comme représentation secondaire de la seconde,

Recommande que les fréquences des transitions suivantes soient utilisées comme représentations secondaires de la seconde et soient intégrées à la nouvelle liste des valeurs recommandées des fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde :

La transition quantique hyperfine non perturbée de l'état fondamental de l'atome de 87Rb, à la fréquence de f87Rb = 6 834 682 610,904 324 Hz, avec une incertitude-type relative estimée de 3 × 10−15,

La transition optique non perturbée 5s 2S1/2 – 4d 2D5/2 de l'ion de 88Sr+, à la fréquence de f88Sr+ = 444 779 044 095 484 Hz, avec une incertitude-type relative estimée de 7 × 10−15,

La transition optique non perturbée 5d10 6s 2S1/2 (F = 0) – 5d 9 6s22D5/2(F = 2) de l'ion de 199Hg+, à la fréquence de f199Hg+ = 1 064 721 609 899 145 Hz, avec une incertitude-type relative estimée de 3 × 10−15,

la transition optique non perturbée 6s 2S1/2(F = 0) – 5d 2D3/2 (F = 2) de l'ion de 171Yb+, à la fréquence de f171Yb+ = 688 358 979 309 308 Hz, avec une incertitude-type relative estimée de 9 × 10−15,

La transition optique non perturbée 5s21S0 – 5s 5p 3P0 de l'atome neutre de 87Sr, à la fréquence de f87Sr = 429 228 004 229 877 Hz, avec une incertitude-type relative estimée de 1,5 × 10−14. »

Cette évolution de la définition de la seconde nous montre donc clairement qu'elle est la conséquence de l'évolution des besoins générés par l'économie en générale et l'industrie en particulier. Mais cette évolution reste aussi fortement tributaire de deux causes distinctes et fortement corrélées :

L'état de la technologie disponible à l'instant où la demande d'évolution de la définition en provenance du monde industriel et économique se fait sentir,

L'état des connaissances en physique et particulièrement de la nature des deux lois fondamentales reconnues à cet instant particulier.

Ce mode opératoire a conduit les métrologues ainsi que les physiciens, depuis la 13ème CGPM, et officiellement depuis les 19ème et 20ème CGPM, à se demander si l'énoncer des définitions des unités du SI à partir des lois physiques est une bonne solution en termes de pérennité à long terme, mais également :

« Invite les laboratoires nationaux à réfléchir à une nouvelle définition de l'unité de masse fondée sur des constantes fondamentales ou atomiques. »

Tout changement de définition n'est pas sans conséquences financières. Changer de définition entraîne nécessairement une remise en cause des machines de calibration, donc des chaînes de production et la mise au rebut de nombre des anciens objets fabriqués ; changer de définition c'est également accepter la refonte de certaines procédures de standardisation, la

remise en cause de la chaîne de qualité et de plusieurs processus industriels. C'est à partir de ce constat qu'une autre base de fondation fut recherchée, processus qui conduisit progressivement à ce consensus vers le choix des constantes fondamentales, objets offrant une constance empirique observée quel que soit l'instant de l'espace-temps où elles sont mesurées et apparemment indépendantes de l'évolution des théories fondamentales de la physique.

Le choix de la définition de la seconde comme multiple d'un certains nombres de périodes de la lumière résultant d'une transition entre deux états quantiques d'un même atome entraîne un a priori : l'utilisation du concept de saut quantique, dont la nature reste une question ouverte, bien que faisant toujours l'objet d'études empiriques[71] et théoriques, comme une constante de la nature. Cette constance repose sur deux bases solides : d'une part les très nombreuses mesures qui ont conduit à la reconnaissance de l'invariabilité spatio-temporelle de l'onde lumineuse émise par ce saut quantique, et d'autre part la solidité de la mécanique quantique dans son interprétation standard, modèle théorique de représentation du monde, qui décrit l'origine de ses sauts quantiques simplement comme une transition énergétique entre deux états d'un même atome. La question de la nature de ces sauts quantiques reste encore une question en partie ouverte ; nous reviendrons sur ce concept de saut quantique dans le chapitre 4.

Mais la fréquence de l'onde électromagnétique générée par ce saut quantique de l'atome de césium ne peut pas vraiment être définie comme une constante fondamentale car cela entraînerait également l'attribution de ce statut à tous les sauts quantiques possibles de tous les atomes et molécules complexes pouvant exister. Par contre attribuer ce statut à la constante de Rydberg, associé à chaque saut quantique, semble plus approprié pour certains physiciens. Comme le font remarquer Flowers Margolis et Klein[72] :

« La constante de Rydberg pourrait être considérée comme la constante fondamentale, unité de base des fréquences, car elle est déterminée avec une incertitude relative de 6,6 10^{-12} qui est actuellement la limite à laquelle une fréquence atomique peut être calculée à partir des constantes fondamentales. »

Mais tel n'est pas le cas dans la définition actuelle qui considère le saut quantique de l'atome de césium comme une pseudo constante fondamentale même si fondamentalement il n'en a clairement pas les caractéristiques.

Dans son rapport de 2004[73], le groupe de travail sur la métrologie du futur de l'académie des technologies explique que :

« La mesure du temps est à la pointe de la métrologie : l'exactitude des horloges atomiques gagne un facteur n tous les dix ans. Grace à ce très haut niveau d'exactitude, elle tire vers le haut toutes les autres mesures qui se ramènent le plus souvent à une mesure de temps ou de fréquence. »

Et un peu plus loin ce même rapport précise que la définition de la seconde, compte tenu de cette amélioration rapide de la précision de mesure, est encore une question discutée :

« Les futures redéfinitions de la seconde constituent un débat ouvert : le rubidium a des avantages sur le césium ; l'hydrogène séduit beaucoup de physiciens métrologues ; la constante de Rydberg et la masse de l'électron permettront peut-être un jour de rattacher la seconde à une constante fondamentale si la théorie fait assez de progrès. »

Ainsi les métrologues reconnaissent explicitement que la définition de la seconde fondée sur un saut quantique particulier n'est pas satisfaisante dans le sens où elle se démarque fortement de celles des autres unités qui font clairement référence à une unique constante fondamentale, excepté le kilogramme qui en utilise deux : la constante de Planck h et la charge de l'électron e. ils reconnaissent par conséquent que les définitions des unités de mesure telles qu'elles sont ne satisfont pas au désir affirmé de n'utiliser comme référence que les constantes

[71] Minev Z. K. et al, 2019, Nature, vol. 570, pp. 200 - 204

[72] Flowers J. L., Margolis H. S. and Klein H. A., 2004, Contemp. Phys. 45, 123

[73] Académie des technologies, 2004, groupe de travail sur la métrologie du futur

fondamentales, et les constantes universelles étant de préférence réservées aux unités de mesure primaires.

Nous reviendrons sur cette question au chapitre 4, où nous discuteront plus précisément du choix fait par les métrologues quant à la redéfinition des unités du SI en fonction d'un nombre restreint de constantes fondamentales et du choix de la constante associée à chaque unité.

Évolution de la définition du mètre

L'unité de longueur, le mètre, a été définie en 1791 comme le quart de la dix millionième partie du méridien terrestre. La mesure de la longueur du méridien fut établie par une méthode de triangulation qui admettait une incertitude de mesure compatible avec les nécessités économiques de l'époque. Ce sont Jean baptiste Delambre et Pierre Mechain qui de 1792 à 1798 vont mesurer le méridien terrestre en relevant précisément la distance comprise entre Dunkerque et Barcelone.

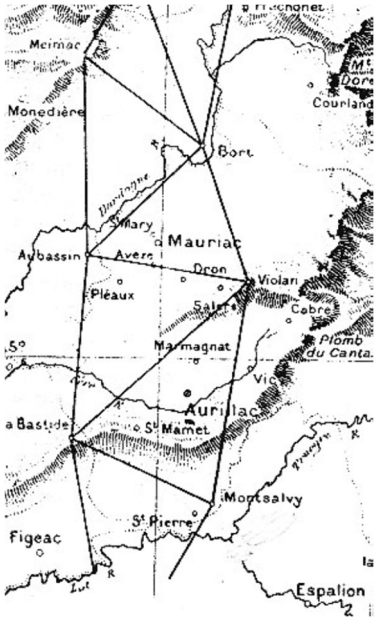

Figure 2 : Extrait de la carte réalisée par Delambre pour la mesure du méridien terrestre

Pour calculer le mètre, alors exprimé en lignes de la toise de l'Académie, Delambre estimait qu'il fallait tenir compte de l'aplatissement de la Terre aux pôles. Pour cela il utilisa la relation de définition du mètre :

1 mètre = 443,39271 – 27,70019 f + 378,694 f² lignes (la ligne étant une unité en usage à cette époque)

Les valeurs mesurées de cet aplatissement conduisaient à une grande dispersion. Delambre dut se résigner à recourir à l'arc mesuré au Pérou qui selon lui ne correspondait pas aux critères retenus pour la définition du mètre unité. Finalement il aboutit à la valeur mentionnée dans la relation calculant la valeur du mètre unité. Mais avec cette valeur la valeur du quart du méridien terrestre devenait égale à 10 000 724 mètres, au lieu des 10 000 000 de mètres requis par la définition choisie. La commission va résoudre cette difficulté en décrétant de façon autoritaire que l'aplatissement était de 1/334, valeur qui conduisait au quart du méridien égal exactement à la bonne valeur.

Cette définition du mètre, comme partie du méridien terrestre, va perdurer jusqu'à l'apparition des technologies de spectroscopie à la fin du 19ème siècle. Durant les années 1892-1893 Michelson et René Benoît vont réaliser une série de mesure au BIPM pour déterminer la longueur d'onde d'une raie rouge du Cadmium ; à cette époque la finesse de cette raie était insuffisante, trop large pour servir de base à une nouvelle définition du mètre unité, mais était adaptée pour une utilisation en tant que référence en spectroscopie. Les métrologues comprirent alors que s'ils arrivaient à obtenir une grande précision sur la mesure de la longueur d'onde

associée à une raie d'émission atomique, alors ils pourraient initier le processus de changement de définition auquel ils aspiraient majoritairement.

Sur le plan de la technologie mise en œuvre par les métrologues, les progrès ont été lents mais réguliers : vers les années 1889 la précision des mesures du mètre était d'environ 10^{-7}. Il faudra attendre presque 70 ans pour atteindre la mesure d'une longueur d'onde avec une précision atteignant les 10^{-9}. C'est la découverte de l'effet laser[74], au début des années 1960, et son application dans la production de lasers de précision qui va permettre de faire progresser de façon fulgurante le domaine de la métrologie et en particulier la mesure du mètre et de la seconde. Ce sont également les technologies résultant de cette découverte qui vont permettre d'atteindre des niveaux de précision compatibles avec les attentes du monde industriel, en particulier celles du domaine de l'électronique, et celles de la recherche fondamentale et appliquée en physique. Mais ce développement a aussi nécessité la convergence d'intérêts économiques et industriels avec la représentation du monde par les physiciens théoriciens. La forte industrialisation du monde occidentale pendant les années 1945-1975, période que l'on connaît sous le nom de « période des trente glorieuses » va focaliser l'attention des milieux de la recherche, tant Universitaires qu'industriels, vers des développements majoritairement technologiques ; Il fallait produire pour alimenter les efforts de reconstruction du monde occidental, relancer l'économie, et il était nécessaire pour cela de résoudre rapidement d'innombrables problèmes d'ordre pratique posés par les progrès des machines industrielles en laissant de côté certaines question fondamentales de la physique, comme par exemple la nature de la charge électrique et son caractère fondamentale.

Par exemple, durant cette période des années 1970, la miniaturisation croissante des composants électroniques va conduire les laboratoires privés et publics à étudier et développer des techniques permettant la mesure des états de surface de matériaux tels les monocristaux de silicium à l'aide de microscopes électroniques[75]. L'obtention de vides de plus en plus poussés[76] pour améliorer la pureté dans les processus de fabrication des substrats de silicium[77] et des autres matériaux utilisés, va contribuer au développement de la spectroscopie à rayons X[78], qui elle-même va permettre une analyse fine des défauts de cristallisation de certains matériaux, par exemple les plaques de silicium sous forme de mono cristaux.

Le développement de la technologie dans de nombreux domaines tel que l'optique, l'émergence de l'électronique et la découverte de dispositifs, comme le microscope électronique donnant accès aux mesures d'objets appartenant au domaine microscopique, ont poussé la demande industrielle et scientifique en général vers des contraintes de précision de mesure de distances incompatibles avec celles autorisées par l'utilisation d'étalons d'unités matérialisés sous forme d'artefacts. La question de l'abandon de tels artefacts, notamment celle du mètre étalon, s'est donc posée clairement. Le choix des métrologues s'est alors orienté naturellement vers l'utilisation des constantes fondamentales qui présentaient l'avantage de rester constantes quelles que soient les conditions, l'instant ou le lieu de mesure, d'autant qu'une telle constante avait déjà été utilisée avec succès pour la redéfinition de la seconde.

---

[74] Maiman T. H., 1960, Stimulated Optical Radiation in Ruby, Nature,187, 493

[75] Le premier prototype de microscope électronique est construit en 1931 par les ingénieurs allemands Ernst Ruska et Max Knoll

[76] la pompe à mercure qui permet d'atteindre aisément des pressions de l'ordre de 10^{-5} Torr dans les années 1910, la pompe ionique, qui permet, elle, d'atteindre des vides de 10^{-7} Torr a été développé vers 1933 ; les pompes à diffusion qui vont permettre d'atteindre des ultra vide de 10^{-11} Torr ne seront réalisées que dans le courant des années 1960

[77] Les premiers lingots de silicium pur de 25 mm d'épaisseur ont été fabriqués en 1964

[78] Les débuts de la spectroscopie d'absorption des rayons X remontent à 1913. Cette technologie est attribuée à Maurice de Broglie suite à ces travaux de doctorat sur l'onde pilote associée aux particules massiques en mouvement

Le souhait des physiciens et des métrologues est une chose, mais la réalité du monde économique et industriel en est une autre ; ce dernier disposant déjà à cette époque des leviers nécessaires pour le financement et l'orientation de la recherche, ses souhaits prévalaient le plus souvent sur ceux des physiciens théoriciens. C'est au cours des années 1950 que l'on commença à disposer des technologies nécessaires à la découverte de raies suffisamment fines pour envisager de remplacer le mètre étalon. C'est en effet dans ces années de milieu de siècle que la séparation des isotopes du Krypton fut enfin possible. En étudiant les caractéristiques spectroscopiques des différents isotopes de ce gaz l'on se rendit compte qu'une raie du Krypton 86 (transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$, avec une longueur d'onde égale à 6057,80 Å), possédait la finesse suffisante pour être utiliser pour un changement de définition du mètre et mettre un terme à l'utilisation d'un artefact pour cette unité. En utilisant cette raie fine du Krypton 86, on atteignait une précision de 10^{-9}, soit un facteur 100 gagné par rapport aux anciennes mesures.

Avec l'utilisation comme référence de la longueur d'onde de la raie du Krypton 86, on atteint en pratique une précision voisine de $4\ 10^{-9}$ qui permettait le raccordement à la valeur du mètre, étalon matérialisé, par l'application d'un coefficient multiplicateur arbitrairement fixé à 1650763,73. Ce fut la 11ème CGPM, le 14 octobre 1960, qui valida le changement de la définition de la seconde en la définissant comme la une fraction de la durée de l'année tropique 1900, et du mètre en le rattachant à un multiple d'une longueur d'onde mettant fin à l'utilisation de l'étalon matériel du BIPM :

« Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux 2p10 et 5d5 de l'atome de krypton-86 ».[79]

Cette décision impliquait que chaque laboratoire privé ou gouvernemental pouvait légitimement procéder par lui-même à une calibration des copies des mètres étalons matérialisés qu'ils utilisaient. Le rôle du BIPM, n'étant plus celui du contrôle des artefacts et de la certification de leurs copies par rapport à l'original, se trouvait réorienté vers une responsabilité de simple diffusion de la définition et de sa compréhension ainsi que du contrôle du respect des règles édictées pour la mise en pratique en vue obtenir une mesure spectroscopique répondant aux standards définis et adoptés par les états membres.

Pour améliorer la précision des mesures de l'unité de temps, une transition atomique hyperfine de l'atome de Césium 133 avait été choisie. Avec les technologies disponibles, elle permettait l'obtention d'une précision en accord avec les demandes tant des théoriciens que des différents acteurs des domaines industriels et économiques. La seconde, unité de temps définie comme la fraction 1/86 400 du jour solaire moyen, fut ainsi remplacée lors de la 13ème C.G.P.M. de 1967-68 par une définition faisant exclusivement référence aux caractéristiques spectroscopiques d'un isotope particulier de l'atome de Césium :

« La seconde est 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 ».

A partir de 1968 les unités du mètre et de la seconde se trouvaient donc définies selon un même concept, celui des caractéristiques de l'émission d'une raie hyperfine d'un atome donné. Elles étaient de fait indépendantes des conditions à la fois du lieu et de l'époque de la mesure, défauts qui étaient le propre de l'étalon matériel du mètre. Il ne subsistait comme étalon matériel, comme artefact, que le kilogramme dont on ne voyait pas comment lier sa définition de manière directe à la longueur d'onde d'une raie d'un atome.

L'avantage décisif du laser par rapport à toute autre source de lumière est la longueur de cohérence d'un train d'onde, très supérieure à celle de la lumière ordinaire qui ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres, permettant ainsi l'utilisation de cette lumière sur de grandes distances en conservant une cohérence de la phase des ondes lumineuses. Cette propriété

[79] BIPM compte rendu de la 11ème CGPM, liste des résolutions

autorise la réalisation de phénomènes d'interférences sur des échelles de distances compatibles avec les besoins de la métrologie. Mais encore faut-il pour atteindre des degrés de précision très élevés pour pouvoir garantir une stabilité de la fréquence laser sur des périodes de temps compatibles avec la précision de mesure de ces distances.

L'unité de longueur étant liée à une mesure spectroscopique, la précision en découlant est dépendante du choix technologique utilisée, les lasers. La précision de la mesure du temps, obtenue avec les horloges au Césium avoisinait, elle, 10^{-15} voire 10^{-16}. La précision de la mesure du mètre, calquée sur celle associée aux technologies des lasers, ne dépassait guère les $4\ 10^{-9}$. Il était alors tentant de lier la définition du mètre à la seule mesure de l'unité de temps afin d'opérer un transfert à moindre cout de la précision de mesure depuis la mesure d'une longueur d'onde vers celle de la durée de référence, la seconde. Mais pour réaliser ce changement de définition du mètre il fallait s'assurer que l'on pouvait mesurer la vitesse de la lumière avec un degré de précision compatible avec cette modification et surtout avec le degré de précision de la mesure de la seconde.

On se rendit compte alors qu'en asservissant des lasers de précision sur des transitions atomiques à l'aide d'un système électronique du type des boucles à asservissements de phases, on pouvait à la fois mesurer, de façon distincte, la fréquence et la longueur d'onde de la lumière émise par ces lasers avec un même degré de précision. Il devenait de cette façon possible de pouvoir définir avec une très grande précision la vitesse de la lumière elle-même calculée comme le produit de la fréquence par la longueur d'onde :

$$c = \lambda . f$$

La précision obtenue sur la mesure de la vitesse de la lumière par ce procédé était environ 100 fois supérieure à celle utilisant les méthodologies utilisées à cette époque, toutes liées à des mesures du type interférométrique et à l'utilisation de l'étalon matériel de longueur, la barre en platine iridié. Cette inversion de positionnement dans la définition du mètre se trouvait être, le meilleur compromis, la meilleure façon d'accéder à un degré de précision, toujours croissant, compatible avec les demandes exprimées par le monde économique et scientifique[80].

Pour valider cette définition, et bénéficier de cet accroissement de précision sur la mesure des distances, il était préalablement nécessaire de fixer conventionnellement la valeur de la vitesse de la lumière afin de reporter l'incertitude de mesure, donc le degré de précision, sur la seule définition de la seconde. Celle-ci, fondée sur des horloges au césium, permet une précision actuellement meilleure que quelques 10^{-16}.

C'est ainsi qu'en 1983, la 17ème CGPM choisit de redéfinir le mètre en attribuant conventionnellement une valeur exacte à la vitesse de la lumière :

« Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1 / 299 792 458 seconde ».

La valeur de la vitesse de la lumière pût alors être fixée, quant à elle, à la valeur de 299 792 458 m/s.

La précision résultant de l'utilisation de cette nouvelle définition est de 10^{-10} pour des mesures de distances de faibles valeurs et peut atteindre 10^{-15} pour la mesure de distances astronomiques. La raison de ce décalage a été analysée comme provenant principalement des conditions de surface des miroirs utilisés pour les mesures de faibles longueurs : plus les distances mesurées sont faibles et plus les défauts de surface des miroirs utilisés dans les dispositifs de mesure sont importants relativement aux distances mesurées. Il faut noter que des recherches sont en cours sur l'utilisation d'autres raies spectroscopiques, dans le domaine de la lumière visible, permettant d'espérer, selon l'avis des métrologues, une amélioration de la

[80] Petley B. W., 1983, Some of the physical assumptions which are implicit in the proposed new definition of the metre are discussed, including the mass of the photon and the constancy of the fine structure constant, Nature 303, 373

précision de mesure d'environ un facteur 100 en utilisant notamment certaines transitions du strontium ou du mercure notamment.

Il fallut vingt-trois ans entre la première définition du mètre, à partir de la longueur d'onde correspondant à une transition entre deux états d'un atome donné, et la définition actuelle se référant à une distance parcourue par une onde dans le vide pendant un intervalle de temps donné. Cette période correspond au temps nécessaire à l'obtention et à la mise au point de technologies nécessaires pour atteindre une telle précision dans les mesures des longueurs d'ondes et des durées, mais elle aurait pu être beaucoup plus longue sans la pression conjointe du monde économico-industriel et de celui de la recherche qui ont vu dans la possibilité de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte un excellent moyen de gagner encore en précision sans avoir à attendre et à financer de nouvelles études. Des périodes de cinquante ans entre des changements de définition étant monnaie courante en métrologie, la définition, de toute grandeur est toujours le résultat d'une combinaison équilibrée entre connaissances scientifiques fondamentales, résultats empiriques, les objectifs de précisions définis par les laboratoires de recherches et le monde industrialo-économique, le contexte politique entre les différents états concernés par le système international de mesure, et les technologies disponibles à un instant donné. Ce mélange quasi permanent d'interactions entre les développements des sciences fondamentales et de la technologie et le monde économico-politique ainsi que la sociologie des pays concernés, a été mis clairement en évidence et de manière particulièrement claire par J. L. Hall[81]

Le prix à payer par de tels compromis est l'acceptation d'hypothèses a priori qui pourraient se révéler fausses sur une durée dépassant largement les bénéfices visés par ces décisions : dans le cas du changement de définition du mètre, l'hypothèse d'invariabilité absolue des constantes dont la valeur est figée de façon conventionnelle est certainement valable au regard de nos connaissances actuelles, mais rien ne permet d'accréditer la véracité de cette hypothèse à des échelles spatiales beaucoup plus importantes ou sur de très longues périodes de temps s'étendant au-delà de la période envisagée par les milieux économiques pour tirer bénéfice de ce choix conventionnel. Pour certains physiciens[82], cette indépendance temporelle et spatiale des paramètres fondamentaux découle du principe d'équivalence énoncé en 1915 par Einstein :

« L'hypothèse que la valeur des paramètres fondamentaux ne dépend pas de l'espace et du temps prend sa véritable dimension en 1915 quand Albert Einstein postule ce qui prendra le nom de principe d'équivalence d'Einstein. Ce principe, à la base de la théorie de la relativité générale, s'articule en trois hypothèses: l'Universalité de la chute libre (tout corps tombe de façon identique dans un champ de gravité externe, indépendamment de sa masse et de sa composition chimique), l'invariance de position locale (le résultat de toute expérience ne faisant pas intervenir la gravitation est indépendant du lieu et de l'instant où elle est effectuée), et l'invariance de Lorentz locale (le résultat de toute expérience ne faisant pas intervenir la gravitation est indépendant de la vitesse du laboratoire). Si ce principe est valable, on conjecture que la gravitation est forcément l'effet de la courbure de l'espace-temps. Dans ce cadre, toutes les constantes doivent être strictement fixes car sinon le principe d'invariance de position locale serait violé, et avec lui le principe d'équivalence d'Einstein. Il y a donc un lien intime entre cette hypothèse et la théorie de la relativité générale, mais aussi entre cette hypothèse et l'Universalité de la chute libre. »

J.-P Uzan explique que, selon la théorie de la relativité générale, l'énergie d'un système de masse globale m est reliée à cette masse par la relation $E = mc^2$ et qu'ainsi, si la constante de structure fine variait, l'énergie de liaison électromagnétique, celle qui assure la cohésion entre les atomes devrait aussi varier, ce qui va modifier la masse globale du système qui va devenir

[81] Hall J. L., 2011, Learning from the time and length redefinitions, and the meter demotion, phil. Trans. R. Soc. A 369, 4090-4108

[82] Uzan J. P., 2005, les constantes fondamentales, Belin p. 46

m'. Ainsi selon l'instant ou la position du système, son énergie ne serait pas la même si sa vitesse restait constante. On pourrait observer des objets qui vont accélérer ou freiner en changeant de position ou sur un intervalle de temps sans l'intervention d'une force extérieure. De plus l'énergie électromagnétique étant différente entre un proton et un neutron, l'action de la gravitation dépendrait de la composition de l'objet étudié et on serait en présence d'une force additionnelle se rajoutant à la force de gravité.

Nous pouvons raisonnablement supposer que toutes les structures observables dans notre Univers sont régies par des lois qui sont fortement contraintes par la valeur de ces constantes fondamentales. Jusqu'en 2011 environ, une grande quantité d'articles ont rapporté des résultats de mesures tendant à prouver que certaines constantes pouvaient varier avec le temps en particulier la constante de structure fine, constante définie comme composite de plusieurs constantes fondamentales[83] :

$$\alpha = \frac{e^2}{2hc\varepsilon_0}$$

Où e représente la charge de l'électron, h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide et ε_0 la constante de permittivité électrique du vide.

Depuis cette date, les mesures réalisées semblent toutes montrer, à l'inverse, que les constantes sont en fait réellement constantes et indépendantes du point de l'espace-temps envisagé pour leur mesure, ou du moins indépendant de l'instant de mesure. Quelques travaux récents dont ceux de P. Petitjean[84] sur l'étude du rayonnement diffus cosmologique et de la nucléosynthèse primordiale semblent cependant montrer que cette constante de structure fine n'a pas varié sur une période de quatorze milliards d'années de plus de 1%, ce qui est peu mais insuffisant pour conclure sur la stabilité de la valeur numérique de cette constante. Nous reviendrons également sur cette question dans le chapitre 4 de cette étude.

Évolution de la définition du kilogramme

À la fin du 18ème siècle, la situation des unités de mesure, et notamment celle des masses, était anarchique ; elle reposait sur des unités à portée locale, au plus régionales, qui n'avaient aucune cohérence entre elles et dont la valeur n'était pas soumise à une calibration et une vérification reposant sur une méthode scientifique établie[85] :

« *Les tout premiers systèmes de poids et mesures étaient fondés sur la morphologie humaine. Les noms d'unités faisaient référence aux parties du corps : le pouce, la main, le pied, le yard et le cubit correspondaient aux dimensions du corps humain. Par conséquent, ces unités de mesure étaient variables, d'une ville à l'autre, d'un métier à l'autre, et selon le type d'objet à mesurer. Ce manque d'unification du système de mesure était source d'erreurs et de fraudes dans les transactions commerciales et sociales, ce qui mettait un frein au commerce international et faisait obstacle aux progrès des sciences au niveau international. Avec le développement de l'industrie et des échanges commerciaux, le besoin d'harmonisation des poids et mesures entre les pays s'est accru.* »

Profitant de la période révolutionnaire, et en s'appuyant sur les progrès de la physique théoriques et des instruments de mesure, des scientifiques (Borda, Condorcet, Laplace, Lagrange et Monge) vont proposer de remplacer[86] toutes ces unités par un système homogène

[83] Uzan J. P., 2003, The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status, Rev. Mod. Phys., Vol. 75, No. 2

[84] Petitjean P. & J.-P. Uzan, décembre 2004, la lente dérive des constantes, sciences et avenir hors-série, 141 p. 64

[85] www.bipm.fr/fr/bipm/metrology/history.html

[86] Le 8 mai 1790, l'assemblée adopte le principe de l'uniformisation des poids et mesure et demande à l'académie des sciences composée notamment de Borda, Condorcet, Lagrange, Laplace et Monge de choisir une unité de longueur parmi trois possibilités : la longueur du pendule battant la seconde, une fraction de l'équateur et

reposant sur des bases scientifiques permettant une vérification de tous les étalons utilisés dans les échanges économiques au niveau national. Leur idée était simple : si l'on peut définir un système d'unités reposant sur des bases scientifiques reconnues, l'on pourra facilement en déduire la fabrication d'artefacts reproductibles facilitant la vérification des unités de mesure utilisées localement. Il est intéressant de remarquer que ce besoin de disposer d'un artefact comme référence pour les unités de mesure est très ancien et perdure encore aujourd'hui : la réalisation d'une sphère de silicium d'un kilogramme, dont nous allons parler un peu plus loin, constitue la preuve la plus criante de cet attachement de la société des hommes à la matérialisation des unités, au besoin inhérent de voir et de toucher. Pourquoi ce besoin ? Il faut en premier lieu comprendre qu'à chaque modification du système d'unités correspond, ou plus exactement précède des avancées technologiques qui entraînent une demande accrue de précisions incompatibles avec la définition des unités de mesure existante jusque-là[87]. Ce sont les progrès techniques qui favorisent une évolution de l'offre et de la demande dans le monde économique et qui par effet de retour font pression sur les métrologues et les scientifiques pour faire évoluer les systèmes d'unités dans la direction choisie par le monde économique. Ainsi, tout progrès scientifique va entraîner, outre un accroissement de la connaissance théorique et une meilleure perception de notre Univers, des avancées technologiques qui elles-mêmes vont favoriser l'émergence de nouvelles offres économiques agissant sur la société et entraînant une réorientation dynamique de la recherche scientifique et des sciences aux nouveaux besoins de la société comme, par exemple, la modification de la définition de unités de mesure du système international.

Prenons un exemple : l'unité de mesure des longueurs, le mètre. Jusqu'en1960, date de la 11ème CGPM, l'unité de mesure du mètre était représentée par un artefact constitué par une barre en platine iridié dont la longueur était réputée correspondre à une fraction exacte du méridien terrestre. A partir de 1960, le mètre va se référer à un nombre entier de fois la longueur d'onde d'une raie d'émission particulière :

« Le mètre unité est égal à 1650.763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation orangée correspondant à la transition entre les niveaux 2p10 et 5d5 de l'atome de krypton 86 »[88]

Ici ce sont les progrès technologiques dans l'analyse spectroscopique qui vont permettre une sélection de raies hyperfines et donc la mesure de la longueur d'onde associée. Cette capacité technique va ouvrir la porte à une redéfinition du mètre unité en termes de quantité de longueur d'onde d'une raie lumineuse conventionnellement définie. Cette nouvelle définition du mètre va à son tour entraîner l'accès aux techniques de la mécanique de haute précision et à l'amélioration des instruments d'optiques qui vont en retour faciliter une meilleure précision des dispositifs mécaniques.

Par ailleurs, la construction d'un système d'unités reposant sur des lois physiques universellement reconnues par la communauté scientifique allait entrainer son adoption par d'autres nations qui y voyaient un avantage économique et scientifique d'une part par le partage des idées et des résultats d'expériences scientifiques, et d'autre part par la normalisation des systèmes de transport et de diffusion des marchandises. L'introduction de ce premier système d'unités était dotée d'un système de sous unités adoptant le système décimal, ce qui simplifiait énormément les calculs et rendait aisée la compréhension et l'utilisation par chacun de ce système. Jusque-là de nombreuses unités se déclinaient plutôt en multiple de 2 voire de 12 et certaines de ces habitudes ont perdurées, par exemple pour les unités de durée où le système

---

une fraction du méridien terrestre. Sur leur proposition, l'assemblée cherchant exclure toutes conditions arbitraires, va décréter le 30 mars 1791 que c'est le méridien terrestre qui va servir de base à la définition du mètre.

[87] Jozeau M.-F., 1994 la mesure de la Terre au 19ème siècle, nouveaux instruments, nouvelles méthodes, in La Mesure Instruments et Philosophies, collection milieux, Champ Vallon, pp. 95 - 106

[88] Extrait de la Résolution 6 du rapport de la 11ème CGPM de 1960

décimal n'a pas pu être adopté compte tenu des trop nombreux et trop anciens usages dans la société civile et d'un usage très ancré dans la population depuis trop longtemps.

Le choix pour l'unité de masse s'est d'abord porté sur un volume d'eau pure déterminé, ce qui présentait deux avantages déterminants :

Une simplicité pour l'étalonnage du volume de référence, le choix s'étant porté sur un volume d'un litre qui correspondait à un cube de 10 cm de côté,

L'utilisation de l'eau pure, d'obtention aisée par distillation.

C'est le 1er août 1793 qu'est institué officiellement le gramme, dénommé un grave, comme la quantité de masse d'un centimètre cube d'eau distillée à 0°C. Puis, le 7 avril 1795, le gramme est institué : il représente la masse d'un centimètre cube d'eau distillée mesuré à 0°C. Le kilogramme, représenté par la masse d'un litre d'eau, avait été introduite afin de supprimer les trop nombreux problèmes dus à la multitude d'unités régionales dont la stabilité n'était pas clairement définie et qui, de ce fait, affectait l'économie sur le territoire national en compliquant les échanges de marchandises. Mais se posait la question de la reproductibilité de cette définition dans les différentes régions françaises : comment être certain que l'opération de distillation allait être la même partout, et quel type et quelle forme de récipient utiliser pour réduire les erreurs de mesure lors de la réalisation au minimum ? La température de 0°C est-elle la plus adaptée ? Si l'on fixe par une décision d'autorité la forme et le mode de fabrication du récipient, comment s'assurer que les copies réalisées ailleurs seraient bien conforme et respecterait un degré de précision suffisant ? Une possibilité, conserver un litre d'eau de référence et vérifier qu'il remplit bien le récipient. Mais comment garder un litre d'eau sans déperdition notable par évaporation, ou par simple perte lors du transvasement ? Et puis quelle garantie que ce litre d'eau témoin soit encore assez pure après un certain nombre de manipulations. Les difficultés étaient trop importantes au regard des connaissances technologiques de l'époque. Une modification de la définition portant de 0°C à 4°C la température de référence[89] de l'eau sera rapidement introduite pour prendre en compte le fait empirique que c'est à cette température que les caractéristiques de l'eau, notamment son coefficient de dilatation, sont minimales. Mais malgré cet ajustement il fallut se rendre à l'évidence : l'eau n'était pas adaptée pour constituer la référence de la masse et encore moins pour être le matériau constituant l'artefact représentatif de cette unité. La définition par rapport à un litre d'eau pure à 4°C posait plusieurs difficultés qui étaient difficilement acceptable en ce début de siècle. Les principales critiques adressées au choix de cette définition du kilogramme portaient, comme nous l'avons dit, sur :

La définition de l'eau pure utilisée,

La difficulté de mesure de la température choisie, 4°C avec une précision compatible avec la précision visée pour la masse unité,

La mesure exacte d'un litre d'eau, donc de la forme du récipient utilisé.

Dire que l'eau devait être distillée était insuffisant, car selon le processus de distillation utilisé le résultat quant au degré de pureté obtenu peut considérablement varier, ce qui va modifier la quantité de matière de façon faible mais suffisante pour altérer la mesure pour peu que la précision requise soit du même ordre de grandeur que la modification de cette quantité de matière engendrée par différents procédés de distillation. Le choix d'une température donnée, si elle était une condition nécessaire pour éviter les effets de dilatation, ouvrait une possibilité d'erreur sur la mesure de sa valeur et sur l'homogénéisation de la température dans tout le volume d'eau ; enfin la forme du récipient devait résulter d'un compromis entre les précisions de mesure des dimensions permettant de calculer le volume et l'obtention d'une surface au contact de l'air la plus faible possible pour réduire les effets d'évaporation et réduire

[89] 10 décembre 1799 : le kilogramme est défini par un cylindre en platine « matérialisant » la masse du décimètre cube d'eau à 4 °C ; Lefèvre-Gineau et Fabbroni avaient déterminé que la masse du décimètre cube d'eau possèdait une densité maximale à 4°C et non à 0°C.

l'effet de ménisque de la surface introduisant une erreur supplémentaire dans le calcul du volume.

Ces difficultés vont condamner l'eau comme base de l'unité de masse. Et pourtant, si l'on y réfléchit, le choix de l'eau comme artefact pour la définition du kilogramme présentait de nombreux avantages :

Matière commune accessible à tout organisme désirant disposer d'un étalon de référence conforme à la définition acceptée par la communauté internationale,

Disponibilité de moyens modernes d'analyse des éléments polluants résiduels après distillation permettant la définition des normes relatives au taux d'impuretés présentes,

En utilisant les moyens technologiques modernes disponibles pour la mesure des dimensions, la définition d'un volume d'eau de référence aurait probablement été possible.

Alors pourquoi le rejet de ce matériau comme support de l'artefact définissant le kilogramme ? Cet abandon fut guidé, selon nous, par une inadéquation entre les besoins économiques à une période donné et les capacités technologiques nécessaires pour atteindre le degré de précision et de reproductibilité nécessaire afin que la définition adoptée remplisse son rôle tant scientifique qu'industriel.

La conclusion s'imposait d'elle-même : l'eau ne pouvait pas être choisie comme référence pour la matérialisation de l'artefact du kilogramme. Le 11 avril 1795, est constituée l'agence temporaire des poids et mesure. Parmi ces membres, Borda, Haüy et Prony sont chargés de la réalisation d'un poids étalon provisoire pendant que Berthollet, Monge et Vandemmonde vont eux se charger de l'obtention du platine pure en vue de la matérialisation de l'artefact du mètre. C'est en mai 1799, soit quatre années plus tard, qu'une commission composée de Van Swinden, Coulomb, Mascheroni, Vassalli et Trallès, responsable de la vérification de l'unité de poids, le gramme, remet son rapport sur cette unité à l'institut. La loi du 22 juin 1799 (4 messidor de l'an 7) fixe les caractéristiques du kilogramme étalon par référence au platine pur, et notamment la réalisation de l'artefact du kilogramme de référence.

Le platine, métal utilisé par les civilisations précolombiennes, n'apparaît en Europe qu'en 1557 dans les écrits de l'humaniste italien Julius Caesar Scaligero[90] (1484-1558) : Il y présente le platine comme un métal inconnu provenant de mines situées entre Darién (Panama) et Mexico. Mais ce métal ne fut véritablement étudié qu'a partir du 18ème siècle par deux astronomes Antonio de Ulloa et don Jorge Juan y Santacilia (1713-1773). Il fut purifié pour la première fois en 1741 par C. Wood. La réalisation du kilogramme étalon en 1799 utilisa les premiers processus connus qui ne présentaient pas un degré de pureté suffisant même au regard des critères de l'époque. Ce n'est en effet qu'a partir du 19ème siècle que des métallurgistes comme Henri Sainte-Claire Deville[91] (1818-1881) améliorèrent la métallurgie du platine permettant entre autres la fabrication des étalons en alliage de platine et d'iridium, plus stable en température. Il est intéressant de noter que ce grand chimiste a été un adversaire actif de l'atomisme.

Cette modification de la réalisation du kilogramme par un objet métallique fait suite aux mesures expérimentale faites par L. Lefèvre-Gineau avec l'aide de G. Fabbroni qui les ont conduits à montrer que la densité de l'eau pure est maximale à 4°C et non à 0°C comme les savants le pensaient antérieurement. L'eau distillée est donc abandonnée, jugée comme trop compliquée à utiliser et ne garantissant pas la reproductibilité avec un degré de confiance suffisant.

Ainsi, le 10 décembre 1799, la définition du kilogramme étalon, définit comme un cylindre en platine de masse égale à un litre d'eau pure à 4°C, devient la définition légale de l'unité de

[90] Julius Caesar Scaligero, 1557, De subtilitate, ad Cardanum, Paris

[91] 1854, Jacobi apporte au laboratoire de Sainte-Claire Deville des pépites de l'Oural ainsi que du platine démonétisé. Sainte-Claire Deville et Debray séparent les différents métaux constituant la mine du platine, ce sont le platine, le rhodium, le palladium, l'iridium, l'osmium et le ruthénium.

masse. La forme adoptée est celle d'un cylindre dont le diamètre est égal à sa hauteur. Les étalons prototypes de ce kilogramme sont réalisés conformément à cette définition. Le choix de ce métal constituait le meilleur compromis technologique de l'époque : les techniques de fusion et de purification avec un degré de confiance suffisant étaient disponibles et ce métal ne présentait pas de corrosion avérée en présence d'air, comme l'or. Pourquoi les métrologues ont-ils choisi le platine et non l'or, dont la métallurgie était plus aisée déjà à cette époque. Plusieurs raisons déterminantes peuvent être raisonnablement avancées :

La résistance mécanique supérieure du platine par rapport à celle de l'or ; l'or est plus facilement ductile,

Une plus faible dilatation thermique pour le platine que pour l'or,

Une corrosion très faible pour l'or comme pour le platine,

Le fait qu'en dehors de ces deux métaux il n'existait pas d'alternative technologique en cette fin de siècle.

Le choix d'un artefact en métal, et plus précisément en platine, était guidé par la technologie la plus avancée disponible au moment de la définition de l'unité et également par la nécessité économique de disposer d'une référence incontestable par l'ensemble des populations des pays intéressés par ce système d'unités.

Des trois unités primaires constituant ce premier système d'unités, deux se trouvaient ainsi matérialisées par des artefacts : le mètre et le kilogramme, la seconde ne pouvant bien évidemment pas l'être. Le 4 juillet 1837 la loi promulguant ce premier système d'unités national, comprenant trois unités, une de longueur, une de durée et une de masse, est votée. Son utilisation est rendue obligatoire en 1840, après une vague de contestation fondée sur les us et coutumes et sur une forte opposition politique de principe aux décisions prises sous la révolution.

En 1875, dix-sept pays avaient adopté ce système d'unités. Ce n'est que lors de la 9ème conférence organisée par la CGPM en 1948 que furent adoptés les quatre unités complémentaires qui vont former un ensemble de sept unités constituant le SI moderne :

L'Ampère représentant l'intensité du courant électrique,

Le Kelvin unité de température adoptant pour valeur nulle le zéro absolu, grandeur inatteignable compte tenu de sa définition dans le cadre des théories actuelles,

La mole unité de la quantité de matière correspondant à N_a atomes ou molécules de matières (N_a représente le nombre d'Avogadro),

La candela unité d'échelle de l'intensité lumineuse.

De façon pratique, il est possible, pour la compréhension de notre Univers, de définir une unité quelconque, pour toute grandeur physique, à partir de trois unités seulement, pouvant être choisies de façon contingente, par exemple le mètre, la seconde et le kilogramme, les autres n'apparaissant alors que comme des unités dérivées. Nous reviendrons plus en détail sur cet aspect du SI, et plus généralement de tout système d'unités, dans le chapitre suivant dans le paragraphe concernant les systèmes d'unités naturels élaborés à partir d'un jeu réduit de constantes fondamentales.

Le système d'unités de mesure actuel comporte trois unités de mesure dites primaires car les dimensions qui y sont attachées ne sont pas réductibles aux autres dimensions. Mais le choix des unités de mesure primaires procédant d'un choix arbitraire, peut-on en déduire que les trois dimensions de longueur, de masse et de durée le sont également ? Faisant écho à notre réflexion sur la charge électrique élémentaire, celle portée par l'électron, nous pouvons exprimer la dimension d'une charge comme composite à partir des trois dimensions primitives reconnues à ce jour. Mais nous avons soutenu dans le chapitre deux que cette dimension de charge devait être considérée comme une dimension primitive car aucun lien n'est clairement défini entre cette grandeur et les autres reconnues par les physiciens. Tout semble donc procéder du point de vue selon lequel on observe les grandeurs de notre Univers accessibles à notre système de

perception. Il ne s'agit donc pas d'un caractère conventionnel pour ces dimensions primitives mais plutôt une nécessité résultat d'une contrainte par la nature de notre relation au monde. Nous adoptons ici une attitude réaliste, mais aussi phénoménologique.

Depuis la loi de 1837 et jusqu'en novembre 2018, la définition du kilogramme a peu évolué et le kilogramme est restée défini à partir d'un artefact, un objet matérialisé servant de référence à ces copies diffusées dans tous les pays adhérents à la convention du système de mesure. La conférence organisée par la CGPM de 1889 décida que le prototype du kilogramme serait fabriqué en un alliage de platine et d'iridium. Ce choix était la conséquence des difficultés rencontrées dans la reproductibilité du kilogramme, difficultés dont la mise en évidence était devenue possible par les rapides progrès technologiques, notamment en métallurgie, et l'accroissement de la précision des appareils de mesure fabriqués. A ces difficultés s'ajoutait la confusion qui régnait, à cette époque, entre le concept de masse et celui de poids. Sur ce sujet, la CGPM de 1901 différencia clairement ces deux concepts en affirmant que le kilogramme est la quantité de matière comprise dans l'artefact détenu par le BIPM au pavillon de Breteuil à Sèvres :

« Vu la décision contenue dans la formule de sanction des prototypes du Système métrique, acceptée à l'unanimité par la Conférence générale des poids et mesures dans sa réunion du 26 septembre 1889 ; Considérant la nécessité de faire cesser l'ambiguïté qui existe encore dans l'usage courant sur la signification du terme poids, employé tantôt dans le sens du terme masse, tantôt dans le sens du terme effort mécanique ; La Conférence déclare :

1. Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme ;

2. Le terme poids désigne une grandeur de la même nature qu'une force ; le poids d'un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération de la pesanteur ; en particulier, le poids normal d'un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération normale de la pesanteur ;

3. Le nombre adopté dans le Service international des Poids et Mesures pour la valeur de l'accélération normale de la pesanteur est 980,665 cm/s2, nombre sanctionné déjà par quelques législations. »[92].

Cette confusion entre masse et poids est encore largement présente dans la population mondiale, même en ce début du 21ème siècle. Comment expliquer l'existence d'une telle confusion ? Il faut tout d'abord expliquer que dans la vie courante la mesure d'une masse d'un objet se fait à partir d'un appareil de mesure dont le seul objet est de déterminer la force de gravitation, donc son poids : la balance. La balance repose sur la loi physique de gravitation considérée dans son approximation newtonienne c'est-à-dire la force d'interaction entre deux corps matériels, celle qui agit sur un corps pourvu d'une masse et qui tend à l'attirer vers le centre de la Terre. Lorsque chez un commerçant, nous lui demandons un kilogramme de pommes, nous pensons à un nombre suffisant de fruits, donc à une certaine quantité de matière, qui posée sur le plateau d'une balance va être équilibrée par une masse étalon en métal d'un kilogramme. Le résultat de cette mesure sera l'existence d'un équilibre lorsque les forces de gravité subies par ces deux objets, les fruits et la masse de métal représentant le kilogramme unité, seront égales, état concrétisé par la position centrale de l'aiguille de la balance, l'état d'équilibre de ses plateaux. Entre le commerçant et nous il y aura alors accord sur le fait que la quantité de pommes pesée représente bien une masse d'un kilogramme. Il y a donc une confusion engendrée par l'usage courant, et systématique, de la comparaison des masses de différents objets à l'aide d'une balance. L'homme de la rue, celui qui fait partie intégrante du système économique global, va confondre masse et force de pesanteur en utilisant l'unité de masse comme unité de forces et ce d'autant plus facilement que l'habitude a été prise depuis

[92] 3ème CGPM de 1901, Déclaration relative à l'unité de masse et à la définition du poids ; valeur conventionnelle de g_n (CR, 70)

longtemps d'attribuer l'unité de masse aux forces de gravitation ; ne dit-on pas que nous pesons, par exemple, 70 kg. Pour ces opérations de mesure, nous ne disposons pas de dispositif dont la finalité est la détermination de la masse indépendamment de l'intensité de gravité. Une balance rendra le service pour lequel elle a été conçue partout à la surface de la Terre et même sur tout astre aussi éloigné que l'on veut. Une balance de commerçant utilise pour son fonctionnement une valeur moyenne de l'intensité terrestre de la gravité, fixée conventionnellement, quelle que soit sa valeur réelle et sa variation selon le lieu considéré, à la seule exception d'un état d'apesanteur complet, état qui ne se rencontre jamais dans notre Univers tel qu'il se présente à nos observations. La confusion entre masse et poids est donc facile pour l'homme de la rue et peut entraîner certaines erreurs conceptuelles et d'interprétation même si cette confusion reste sans gravité dans l'exécution de nos tâches quotidiennes. Il devenait donc urgent pour la CGPM de 1901 de préciser les choses et la meilleure façon de le faire était effectivement de définir la masse unité, le kilogramme, par référence à un objet physique particulier.

Avec ces précisions apportées à la définition, le divorce entre la physique théorique et la métrologie, très dépendante des impératifs technico économiques, était consommé. Les différences d'analyses et, pour être plus précis d'intérêts à court terme, entre d'une part le monde économique, celui de l'industrie, et d'autre part celui des physiciens théoriciens vont être la cause d'une divergence de point de vue entre une vision conceptuelle des unités et une vision pragmatique fondée sur les nécessités économiques et sociétales. Les besoins du monde industriel, tournés principalement vers la mécanisation des moyens de production, vont se concentrer sur les définitions des unités de mesure qui présentaient le maximum d'applications directes. Ce sera notamment le cas pour les mesures de distances et de durées, où la demande pour une précision toujours plus importantes se faisait forte. Par exemple, le développement des moteurs, tant à vapeur qu'à combustibles fossiles, voyait leurs performances dépendre fortement de la précision d'ajustage des différentes parties mobiles.

En ce qui concernait l'unité de masse, la demande de précision émanait principalement du monde de la chimie avec le dosage des substances entrant dans certaines réactions réaction. Celle-ci restait exigeante, et incompatible avec la précision délivrée par le kilogramme, unité définie à partir de l'eau. C'est pourquoi la CGPM de 1889 prit la décision d'abandonner la référence au décimètre cube d'eau pour la remplacer par un artefact en alliage de platine et d'iridium qui présentait l'immense intérêt d'être parfaitement défini, au moins théoriquement, et d'être facilement disponible et reproductible avec une assez faible incertitude, pour une large diffusion dans le groupe des pays industrialisés. Il est probable, en tenant compte des connaissances dans la science de la chimie de cette fin de siècle, que les principaux défauts inhérents à ce type d'artefact étaient déjà pressentis à cette époque :

Pollution de surface due aux polluants présents dans l'atmosphère de façon variable selon le lieu considéré,

Oxydation faible mais existante, aucun métal n'échappant à ce type de réaction, même ceux réputés non oxydables,

Impuretés présentes dans les composants de l'alliage au moment de la fabrication de l'artefact ou de ses copies.

Mais d'une part ces défauts restaient bien en deçà de la précision attendue et d'autre part ce choix de l'artefact en métal présentait aussi des avantages certains pour l'époque :

Facilité de réalisation de copies de l'artefact original devant servir de référence au kilogramme,

Contrôle et maîtrise de toutes les copies diffusées aux pays et organismes le demandant,

Degré de précision très suffisant en cette fin du 19ème siècle et permettant d'envisager un avenir sur le long terme de cette définition, malgré les difficultés techniques prévisibles que nous venons de mentionner,

Disponibilité quasi immédiate de l'artefact en cas de besoin, contrairement à l'utilisation de l'eau qui ne pouvait être disponible en permanence du fait d'un degré de pollution et d'évaporation permanent.

Au début du 19ème siècle, le rattachement des unités du système d'unités à des grandeurs appartenant à la physique théorique, les constantes fondamentales, prôné par certains physiciens comme Maxwell[93], n'étaient ni envisagé ni souhaité : un divorce important entre le monde industriel et la physique théorique s'était installé rendant les échanges d'arguments difficiles. Cette situation provenait de la divergence d'intérêt d'une part entre le souci de modélisation, de théorisation, de tous les domaines de la physique, et d'autre part les intérêts économiques des industries et du monde de la finance qui réclamaient des solutions simples, peu coûteuses. Les métrologues se trouvaient ainsi entre les deux et devait chercher en permanence des compromis qui, le plus souvent, cherchaient à apporter des réponses technologiques aux besoins métrologiques de plus en plus pressant du monde industriel en pleine révolution.

Il faudra attendre la fin du 20ème siècle, l'émergence de nouveaux dispositifs d'analyse, comme par exemple la spectroscopie[94] et les lasers, et l'ouverture de nouveaux marchés reposant sur ces nouvelles technologies pour pousser le monde industriel et les groupes d'intérêts industriels et financiers à changer de paradigme et réclamer une précision accrue de la définition du kilogramme, rejoignant ainsi les préoccupations de plusieurs physiciens ; parmi ces nouvelles technologies deux vont avoir une grande incidence : la microélectronique dopée par la demande d'équipements informatiques de très petites dimensions et présentant une haute intégration de fonctions, et les nanotechnologies. Si les définitions des unités de longueur et de temps satisfaisaient globalement les caractéristiques de précision et d'utilisabilité attendues pour ces nouveaux produits conçus par les industries de pointe, le kilogramme était un frein évident. Il était le dernier artefact du système d'unités international, et sa matérialisation entraînait une limite dans la précision de mesure des masses totalement incompatible avec de nombreux domaines : ceux de la recherche fondamentale et des applications industrielles, la chimie, la micro-électronique et l'informatique.

Ces avancées technologiques, tournées vers des applications industrielles[95], vont cependant avoir un effet bénéfique pour la métrologie : étant ouvertes sur le monde microscopique, elles vont obliger les métrologues à prendre en compte la mécanique quantique et toutes ces implications tant conceptuelles que pratiques sur le plan de la mesure. Cette nécessaire ouverture va rétablir le dialogue, le rapprochement espéré, entre physiciens théoriciens, métrologues et les différents utilisateurs industriels ; il va permettre en fait de prendre conscience que le temps était venu de changer de référentiel pour la définition des unités, de les rapprocher de grandeurs plus universelles, non matérielles, ne dépendant ni de l'instant ni du lieu de leur mesure : les constantes fondamentales. Ce souci rejoignait le débat philosophique sur l'existence des lois dans les sciences fondamentales comme la physique. La question soulevée portait sur l'existence ou non de lois au sens d'un énoncé d'une régularité valable en tout lieu et en tout temps. Si des lois existent, notamment en physique, alors la métrologie qui lui est associée pour la réalisation des mesures des grandeurs mises en évidences dans les

[93] Maxwell J. C., 1870, discours inaugural de la conférence de l'Association britannique pour l'avancement des sciences

[94] John Herschel (1792-1871) et W.Fox Talbot (1800-1877) suggèrent pour la première fois d'utiliser la spectroscopie pour l'analyse chimique des substances ; Un élément chimique inconnu jusqu'alors fut identifié dans le spectre du Soleil en 1868 par nombreux astronomes lors d'une éclipse de Soleil. Mais l'anglais Sir Normal Lockyer (1836-1920) pu déterminer en 1868 la longueur d'onde exacte de cette raie à 5876Å. Cet élément fut alors nommé "hélium." Ce gaz ne fut identifié sur Terre qu'en 1895.

[95] Réalisation d'un éthylomètre laser : ANR PRCE "ETHYLAS" (2018-2021) en collaboration avec MirSense (www.mirsense.com); E. R. Andrew, A. Bradbury et R. G. Eades, « Removal of Dipolar Broadening of Nuclear Magnetic Resonance Spectra of Solids by Specimen Rotation », Nature, vol. 183, no 4678, 27 juin 1959, p. 1802-1803

dispositifs expérimentaux doit également répondre à ce critère d'indépendance de lieu et de de temps. Nous discuterons de cette question de l'existence des lois en physique dans le chapitre quatre.

Une fois ce constat accepté par les différentes parties, et en tenant compte des technologies maîtrisées, il devenait possible d'orienter les recherches technologiques vers la conception et le développement de nouveaux dispositifs de mesure conduisant à un possible rattachement des unités de mesure à des constantes et donc à une redéfinition complète du SI, redéfinition que les métrologues les plus optimistes pensaient pouvoir rester stable pendant une très longue période, plusieurs centaines d'années selon certains après cette délicate refonte. La dernière unité non rattachée à ces constantes, le kilogramme, le sera finalement en novembre 2018.

Être certain que cette nouvelle version du SI durera de très nombreuses années est impossible à dire (on pensait que le kilogramme matérialisé en platine iridié durerait mille ans !), mais on peut raisonnablement estimer, si aucun bouleversement majeur dans nos connaissances n'intervient rapidement, qu'il durera le temps nécessaire pour se rendre compte que certaines constantes ne sont peut-être pas si fondamentales que cela, que certaines peuvent s'exprimer en fonction d'autres ou bien encore que de nouvelles grandeurs plus fondamentales et plus simples à mettre en œuvre apparaissent et se révèlent technologiquement accessibles.

La situation n'a guère changé depuis la fin du 19ème siècle : la résolution adoptée par la CGPM de novembre 2018 relative au changement de définition du kilogramme procède du même débat entre différents groupes représentant des intérêts divergents. Depuis la naissance des théories de la relativité et de la mécanique quantique, le monde industriel a compris le potentiel économique énorme qui existait dans l'utilisation de ces deux théories pour construire des machines reposant sur le monde de l'infiniment petit. Ce fut la naissance de l'électronique, de l'industrie spatiale, de la chimie moléculaire et enfin le développement généralisé de l'informatique et du monde des nanotechnologies simplifiées par l'apparition des lasers et le développement de technologies comme la microscopie électronique. Ainsi le monde économico-industriel convergeait vers le même objectif que les physiciens : accroître la précision de la définition des unités de mesure en général, du kilogramme en particulier, et rattacher la définition de ces unités aux théories dominantes de la physique théorique.

Pour atteindre cet objectif il fallait définir chaque unité à partir d'une grandeur invariante de sa position dans l'espace-temps de la relativité et sélectionner ces grandeurs en fonction de la simplicité de leurs mesurabilités par les technologies existantes. C'est ainsi qu'à la fin du 20ème siècle, on décida de généraliser la définition des unités de mesure en faisant référence à des constantes fondamentales garantes d'une précision accrue et d'une stabilité des définitions sur de très longues durées. On décida également de choisir les constantes utilisées selon d'une part la précision que l'on pouvait espérer de la mesure de leurs valeurs numériques, mais également en fonction de leur mesurabilité en lien avec l'unité de mesure considérée. Redéfinir les unités à partir des constantes permettait de les lier aux lois de la nature les plus fondamentales que nous connaissons : la relativité, la physique statistique et la mécanique quantique. Ces constantes ne sont pas des objets matériels mais elles sont les témoins de l'existence d'une réalité plus fondamentale que celle décrites par chacune de ces deux théories ; elles sont le lien entre les lois de la Nature et de ce fait nous semblent offrir une stabilité, une pérennité allant bien au-delà de la validité des deux théories majeures qui gouvernent notre connaissance du monde physique ; elles montrent également la faiblesse de nos théories actuelles et de la compréhension des concepts qui y sont rattachés.

Mais pourquoi le choix de la constante de Planck pour le kilogramme et des autres constantes pour servir de fondement aux unités du SI ? La réponse repose autant sur des considérations technologiques, celles dont les métrologues disposaient au moment de la prise de décision, que sur un équilibre entre leurs liens avec les théories fondamentales auxquelles elles se rapportent. Nous reviendrons sur cette attribution des constantes à chaque unité au chapitre suivant.

Depuis la 26ème CGPM[96] de novembre 2018, les états membres du SI ont adopté une nouvelle définition du kilogramme reposant sur la constante de Planck qui, selon certains, devrait restée valable pour au moins mille ans. Mais cette décision masque une grande différence de vue entre les physiciens théoriciens d'une part et la communauté des ingénieurs et des industriels en général d'autre part. Les physiciens voient dans cette évolution la réalisation de leur aspiration : mesurer le monde à partir d'un système d'unités de mesure reposant sur un petit nombre de constantes fondamentales, les constantes Universelles relevant d'une réalité plus profonde que celle que nous observons, celle accessible à nos perceptions sensorielles, et qui reste incomplète puisque ceux qui réalisent ces mesures appartiennent à la Réalité et ne peuvent s'en extraire. Depuis cette évolution du SI les physiciens se demandent maintenant s'il ne va pas être utile de le simplifier, en supprimant par exemple les unités qu'ils considèrent comme secondaires et inutiles : la mole et la candela notamment. Mais cette idée rencontre une opposition fondée sur un pragmatisme économique des ingénieurs et chimistes ; pour eux si l'utilisation des constantes fondamentales répond effectivement à leurs soucis de pérennité des unités et d'une amélioration significative de la précision des instruments de mesure, il n'est pas question de supprimer des unités de mesure qui leur simplifient la vie dans leur travail au quotidien, même si celles-ci ne trouvent aucun justificatif auprès de la physique et de la métrologie. Que deviendrait le travail d'un chimiste sans la mole ! Le pragmatisme technico-économique s'érige en gardien du temple du système d'unités de mesure tel qu'il est défini à ce jour et qui constitue un véritable paradigme. Moyennant cette conservation des sept unités, un consensus s'était réellement dégagé pour le changement de la définition du kilogramme, l'abandon de l'artefact métallique représenté par « le grand K » et son remplacement par une définition du kilogramme comme une fonction de la constante universelle de Planck h.

Avec l'adoption de cette nouvelle définition du kilogramme et le changement concomitant de la définition de l'ampère en la rattachant à une mesure directe de la quantité de charges circulant dans un fil conducteur pendant une unité de temps, de celle de la température redéfinie comme une fonction de la constante de Boltzmann k, on obtient, comme nous l'avons dit, une uniformisation formelle des unités ; Elles peuvent en effet toutes s'exprimer par une unique expression mathématique[97], dans laquelle n'intervient que les constantes fondamentales choisies, une constante de proportionnalité A_i adimensionnée et une série de constantes numériques rationnelles ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i, \eta_i$) représentant les exposants des constantes fondamentales :

$$1\ sec = A_1 h^{\alpha_1} \Delta\nu^{\beta_1} c^{\gamma_1} {k_B}^{\delta_1} {N_a}^{\eta_1}$$
$$1\ m = A_2 h^{\alpha_2} \Delta\nu^{\beta_2} c^{\gamma_2} {k_B}^{\delta_2} {N_a}^{\eta_2}$$
$$1\ kg = A_3 h^{\alpha_3} \Delta\nu^{\beta_3} c^{\gamma_3} {k_B}^{\delta_3} {N_a}^{\eta_3}$$
$$1\ K = A_4 h^{\alpha_4} \Delta\nu^{\beta_4} c^{\gamma_4} {k_B}^{\delta_4} {N_a}^{\eta_4}$$
$$1\ A = A_5 h^{\alpha_5} \Delta\nu^{\beta_5} c^{\gamma_5} {k_B}^{\delta_5} {N_a}^{\eta_5}$$
$$1\ cd = A_6 h^{\alpha_6} \Delta\nu^{\beta_6} c^{\gamma_6} {k_B}^{\delta_6} {N_a}^{\eta_6}$$
$$1\ M = A_7 h^{\alpha_7} \Delta\nu^{\beta_7} c^{\gamma_7} {k_B}^{\delta_7} {N_a}^{\eta_7}$$

Traduire les définitions des unités du SI sous la forme de relations mathématiques, ne différant que par la valeur de coefficient numérique sans dimension, donne à ce système d'unités une homogénéité et une légitimité que la nature des définitions physiques sur lesquelles il est établi ne lui procurait pas. Dire, par exemple, que l'unité de mesure de longueur, le mètre est un temps de vol défini d'un photon dans le vide et que le kilogramme est une fonction d'un quantum d'action h met en évidence les différences conceptuelles des bases de ces deux

[96] Décisions de la CGPM, site internet du BIPM, novembre 2018 Site du BIPM : http://www.bipm.fr

[97] Davies R., 6 april 2018, How to define the base of the revised SI from seven constants with fixed numerical values, rapport BIPM-2018/02

définitions. L'utilisation d'un formalisme unique pour la traduction de ces définitions en langage mathématique permet de s'affranchir de cette différence, mais masque aussi des questions conceptuelles qui restent ouvertes.

Cette écriture mathématique est cependant purement conventionnelle et ne constitue qu'une possibilité de traduction de ces définitions dans le langage mathématique. Le choix opéré de cette représentation mathématique vise donc à conforter ce choix conventionnel. Le choix des constantes nous semble également conventionnel : on aurait tout aussi bien pu remplacer par exemple l'écart de fréquence $\Delta\nu$ obtenu en utilisant deux états hyperfins d'énergie du Césium 133 par la constante de gravitation G, voir ajouter d'autres constantes dans ces expressions comme par exemple la constante cosmologique Λ pour tenir compte de l'évolution des modèles théoriques étudiés par les physiciens théoriciens.

Cette écriture représente en fait un compromis entre les théoriciens, attachés à la cohérence des descriptions de la nature induites par les théories physiques reconnues, et le monde industriel qui est demandeur à la fois d'un accroissement de la précision dans la définition, d'une grande stabilité temporelle de la définition des unités, et d'une plus grande liberté dans la réalisation des opérations de contrôle et de calibrage des artefacts qui ne manqueront pas d'être encore utilisés, notamment pour le kilogramme, dans la vie quotidienne et la majorité des échanges commerciaux.

Paradoxalement, en fixant la valeur de certaines constantes fondamentales, de façon conventionnelle à leurs valeurs numériques les plus précises obtenues à partir des moyens de métrologie disponibles, cela va rendre encore plus inutile les unités dérivées que sont la mole et la candela. Pourquoi en effet conserver, par exemple, l'unité de la candela puisque celle-ci s'exprime facilement sous une combinaison des trois unités primaires donc des trois constantes qui leurs sont liées (c, h et $\Delta\nu$) dont la valeur est devenue exacte par convention.

Il semble que cette contradiction ne soit pas mise en évidence dans les débats en cours : l'impératif unique a été le basculement, le plus rapidement possible, vers la nouvelle définition du kilogramme, concrétisé en novembre 2018, et le maintien du nombre et de la nature des unités constituant le SI. Nous soutenons qu'une des raisons de cette volonté de l'adoption d'une redéfinition rapide du kilogramme à partir d'une constante fondamentale était que la mesure de la constante choisie, la constante de Planck, présentait et présente encore semble-t-il deux résultats légèrement différents selon la méthodologie utilisée pour déterminer sa valeur numérique ; la reconnaissance de cette divergence des résultats empiriques aurait eu comme conséquence le report de la redéfinition du kilogramme à partir de la constante de Planck h. ce retard n'était pas acceptable par les composantes les plus puissantes du SI : les industriels et plus généralement les acteurs de l'économie.

Nous reviendrons, sur cette contradiction et sur l'écart constaté dans les résultats numériques de la mesure de la constante de Planck, au chapitre 4 de cette étude.

Il nous faut maintenant comprendre pourquoi depuis 1889 la définition de l'unité de masse, le kilogramme, n'a pas évolué. Depuis plus de cent ans les progrès scientifiques et technologiques ont été très importants dans le domaine des sciences physiques. Ce fut en tout premier lieu la découverte de la courbure de l'espace-temps comme cause du phénomène de la gravitation, puis la mise en évidence et la compréhension des propriétés quantiques de la matière et de l'énergie. En parallèle ce fut l'émergence de nouvelles technologies telles que l'électronique, l'informatique, les lasers de métrologie, les horloges atomiques, les nanotechnologies, la métallurgie des couches minces et bien d'autres. Bien que la majorité de ces technologies soient apparues à partir de la seconde moitié du 20ème siècle, il a fallu encore attendre les premières années du 21ème siècle pour voir se concrétiser l'idée de définir l'unité de masse à partir de la constante fondamentale h. Alors pourquoi un tel délai ? Pour le comprendre il nous faut retracer l'histoire de la conception de la balance du Watt à partir d'une autre machine d'usage courant aux besoins de la métrologie, la balance de Roberval. Il nous

faut également comprendre les débats autour du choix de la constante fondamentale que les physiciens et les métrologues ont jugé apte à servir de base à cette nouvelle définition de l'unité de masse.

Préalablement, nous allons nous interroger sur l'évolution des concepts sur lesquels reposent la définition de l'unité de masse et les deux autres unités primaires : la seconde et le mètre. Puis nous allons suivre le cheminement de pensée qui a conduit métrologues, industriels et physiciens vers le choix de la constante fondamentale de Planck, h, comme base du kilogramme et la constitution d'un système d'unités homogène ne reposant que sur un jeu de constantes fondamentales, une différente pour chaque unité. Enfin, à la lumière de cette évolution des pensées, nous exposerons les principales étapes qui ont conduit à la conception de la balance du Watt comme outil de mesure métrologique de la constante de Planck h et d'une masse unité, le kilogramme.

Revenons aux concepts physiques attachés aux unités du SI et plus particulièrement aux trois unités primaires. Le mètre fait appel au concept de longueur qui correspond, dans la perception de notre réalité, par exemple à un empilement d'atomes ou de molécules ou au temps mis par un faisceau de lumière pour aller d'un point A de l'espace-temps à un second point B distant. Un empilement, bien qu'entaché d'une erreur aléatoire correspondant aux fluctuations quantiques du nuage électronique, reste une grandeur que nos sens arrivent sans peine à théoriser et sur lequel notre cerveau peut plaquer une image mentale. La distance à laquelle se trouve un objet va être évaluée par nos yeux comme une évaluation du temps mis par la lumière pour atteindre chacun de nos yeux. Une longueur, une distance, parlent directement à nos sens, nul besoin d'une longue explication mathématique pour nous faire comprendre ce que cette grandeur signifie dans l'organisation perceptible de notre Univers. Nous savons bien sûr que nos sens nous mentent souvent et en particulier dans le domaine des distances car la relativité donne une tout autre définition d'une distance : elle prend en compte, d'une part le concept de courbure de l'espace-temps sous l'effet d'une densité d'énergie en redéfinissant ce concept de longueur en termes de géodésique, et d'autre part prend la vitesse relative de l'objet mesuré par rapport à nous, observateur particulier défini comme immobile. La distance entre deux points dans un espace-temps de Riemann est la longueur de la géodésique parcourue par un photon partant de l'un de ces points pour atteindre l'autre, pas la distance sur une ligne droite entre deux points de notre espace tridimensionnel que nos sens perçoivent.

La seconde, quant à elle, se rattache directement à un nombre de périodes de l'onde résultant de la transition entre deux états hyperfins de l'atome de césium 133[98]. Cette unité avait été antérieurement définie lors de la 11ème CGPM d'octobre 1960 comme la 1/86400ème partie du jour moyen de l'année tropique. C'est à partir de cette définition que va être mesurée la fréquence de la raie d'émission entre deux niveaux superfins du césium 133. Une fois que les mesures auront été suffisamment précises, et qu'ainsi la mesure de la fréquence de cette transition quantique était suffisamment corrélée avec l'ancienne unité de temps, la fréquence de ce rayonnement particulier a été conventionnellement fixée lors de la dernière CGPM de 2018. Cet écart de fréquence, $\Delta\nu$, a acquit, pour les scientifiques, le statut de constante fondamentale et est utilisé comme tel par les métrologues. Une seconde correspond à un intervalle de temps, une durée, permettant la réalisation d'un certain nombre d'opérations bien définies ; par exemple une seconde va correspondre à l'émission, lors d'un saut quantique, d'un nombre déterminé de périodes d'une onde lumineuse. Mais de façon théorique, la définition de la seconde ne découle pas d'une caractéristique intrinsèque de la matière, mais seulement de la fréquence d'une onde électromagnétique résultant d'un saut quantique. Pouvons-nous concevoir une unité de durée sans l'aide de la matière, simplement à partir d'une onde se

[98] Résolution 1 de la 26ème CGPM (2018) : La seconde est 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 à la température du zéro absolu

propageant dans l'espace-temps ? La réponse est négative car toute onde, quelle que soit sa nature est la conséquence d'un phénomène dans lequel la matière intervient ; si nous voulons garantir la constance de cette unité, certaines caractéristiques de la matière nous sont nécessaires pour définir le phénomène responsable de la génération de cette onde ayant une fréquence déterminée. La seconde est un nombre entier de période d'une onde électromagnétique choisie de façon conventionnelle ; le mètre, lui, est un temps de vol d'une onde électromagnétique de fréquence et d'origine quelconque. Aucune de ces deux définitions n'utilise les caractéristiques intrinsèques des quanta de matière que nous appelons les particules élémentaires.

Cet écart de fréquence utilisé comme constante fondamentale soulève une question déjà abordé précédemment : pourquoi utiliser la fréquence d'une onde, conséquence d'un saut quantique, comme constante fondamentale et pas une autre grandeur formée à partir de constantes fondamentales comme la constante de Rydberg ? Peut-on réellement lui attribuer un statut de constante ?

Quant au kilogramme, il est exprimé, depuis la CGPM de novembre 2018, comme une fonction de la constante fondamentale h ainsi que de la charge de l'électron, e, grandeur ayant également le statut de constante fondamentale comme nous l'avons vu plus haut au chapitre 2. Les définitions du mètre comme de la seconde font appel chacun à une constante fondamentale, chacune d'elle présentant un rapport évident avec la grandeur considérée :

Le mètre se réfère à la constante c, grandeur ayant la dimension d'une vitesse, donc le rapport d'une distance divisée par un temps,

La seconde se réfère, comme nous venons de le rappeler, à la fréquence constante d'un saut quantique, celui défini par deux niveaux hyperfins du césium 133.

Mais le choix de la constante h comme référence du kilogramme ne présente pas de liens évidents avec cette grandeur. Il a même été nécessaire d'ajouter une dépendance à la charge e de l'électron pour obtenir une définition cohérente du kilogramme. L'aboutissement à ce choix est le résultat d'une longue évolution des idées et des technologies, à de longs débats, qui ont finis par imposer ce choix de constante, mais également la conséquence de notre système de perception peu adapté à la compréhension du concept de masse.

Les progrès dans le domaine des sciences ne peuvent ni se comprendre ni s'analyser sans la reconnaissance du rôle joué par les perceptions humaines. Le savoir dans ce domaine s'est lentement bâtit au fil des nombreuses expériences réalisées et des modèles théoriques élaborés. Toutes ces observations et mesures ont été faites avec l'aide d'équipements de mesure, lesquels ont été construits et utilisés pour être compatibles avec ces mêmes sens de perception, pour en être le prolongement. Ce n'est que très récemment que l'homme a commencé à élaborer et réaliser des instruments de mesure adaptés à des grandeurs échappant complétement à nos sens : les détecteurs des ondes gravitationnelles en sont le meilleur exemple. Si nous étions privés de notre système de perception, aucune mesure ne serait possible et la progression de tout notre savoir sur le monde réel aurait été anéantie. Ainsi nos sens sont à la fois un lien indispensable à la réalité, nous permettant de survivre et de nous adapter dans ce monde, mais également le seul lien nous poussant à accroitre la compréhension de la structure et de la nature de cette Réalité. Mais ces sens constituent aussi un filtre nous voilant une grande partie de cette Réalité. Décrire et comprendre cet Univers, dont nous sommes une partie, passe par eux. Ils sont imparfaits et notre connaissance restera à jamais parcellaire, voire nous conduira à faire des erreurs dans sa compréhension.

Toutes les hypothèses et modèles théoriques que nous avançons ne sont qu'un reflet partiel et déformé de cette réalité. Ils sont en permanence modifiés, remodelés au fil des nouveaux résultats expérimentaux. Nous en sommes réduits à bâtir des théories de « sable » qui seront vite réduites à néant les unes après les autres. Bien sûr il est possible de soutenir la position contraire en faisant remarquer que l'Univers est un objet physique doté de caractéristiques pouvant être décrites par des modèles théoriques, ces modèles mathématiques pouvant alors

servir de « treuil ontologique » capable de faire apparaître de nouveaux éléments de réalité dont certains peuvent échapper à notre système de perception. Nous pensons cependant que, bien que ces modèles mathématiques aient permis par exemple la découverte et la mesure de phénomènes comme les ondes gravitationnelles, notre cerveau reste conditionné par nos sens et que les théories mathématiques conçues pour satisfaire les attentes des physiciens et procurer une description de la réalité ne sont que des objets contingents, ce qui explique en partie les lois d'incomplétude découvertes par Gödel[99]. Même reposant sur des modèles mathématiques adaptées, nos théories physiques ne pourront que décrire une vision partielle de la Réalité qui, elle, nous est inaccessible.

Par exemple, qu'est-ce qu'une distance ? Est-ce ce qui nous permet, selon notre perception, de séparer des objets matériels distincts dans une même direction ? Autrement dit, se résume-t-elle à la sensation de séparation des objets, leur éloignements relatifs ? Est-ce une simple construction de notre cerveau, conséquence de ces mêmes sensations, nous permettant de concevoir une spatialisation, une étendue dans les trois directions, ou est-ce un effet des interactions devant être considérées comme la seule réalité vraie ? Une direction n'a de sens que si nous pouvons définir un espace à au moins deux dimensions ! Pas d'espace, pas de direction, seule une certaine séparation des objets pourrait subsister ! Mais si ce que nous considérons comme distinct n'est que la partie « émergée », visible, d'un même tout, ce que nous qualifions de dimension pourrait n'être qu'une apparence non réelle. À une dimension spatiale est toujours associée la notion de volume, partie de l'espace tel que nous le percevons mais dont nous ne pouvons affirmer la réalité.

Dans un espace à deux dimensions un volume s'appelle une surface. Le volume est lui-même lié à la représentation que nous nous faisons de l'atome. Par les expériences de diffusions de particules ou de lumières, nous avons mesuré le volume de l'atome et de son noyau. Cette idée même découle directement de nos sens, le touché, l'ouïe et la vue principalement, les mesures faites par les équipements de métrologie que nous développons, et l'analyse que notre cerveau en fait. Le concept de masse est le résultat de la conjonction du concept de volume de matière et de celui de poids, lui-même lié à la structure de l'espace-temps non directement mesurable. Notre cerveau, pour atteindre cet objectif, agit comme un super ordinateur, mais pas seulement. Une composante de nous-même est capable de synthétiser des idées ne reposant sur aucune observation ni aucune logique de la réalité qui nous est accessible. Elle semble puiser ses ressources dans une ressource infinie[100]…

Berkeley[101] le premier réalisa une étude sur la perception du monde par des aveugles de naissance retrouvant la vue à l'âge adulte. Privé de la vue, l'aveugle perçoit le monde sur un mode séquentiel de sensations tactiles. Ainsi, la façon de toucher un objet, selon un mode opératoire précis, lui permettra en mémorisant ces séquences de reconnaître ultérieurement le même objet ou un similaire. Pour lui, le monde externe, au moins la partie qui lui est accessible, est entièrement représentée par un espace à une dimension utilisant le mode séquentiel. Bien que sachant par les échanges avec d'autres personnes que le monde possède trois dimensions spatiales et une temporelle, il ne le percevra que comme un monde à deux dimensions : une temporelle et une spatiale.

Tout semble donc affaire de perception et de capteurs. Nos capteurs, que sont nos cinq sens principaux, ne traduisent que l'expression d'un monde apparent, accessible, à trois dimensions spatiales et une temporelle, bien que nous soyons peut-être « immergés », selon la relativité générale et surtout son prolongement développé par Kaluza et Klein[102], dans un environnement

[99] Girard J.Y., Lafont Y., Taylor P., 1990, Proofs and Types, Cambridge U. Press,

[100] Jung C. G., 1964, Dialectique du moi et de l'inconscient, Folio Essais, Gallimard, première édition en 1933

[101] Berkeley, 1734, Aleiphron ou le petit philosophe et une nouvelle théorie de la vision, La Haye, Benjamin Gibert

[102] Witten E., 31 Jan 2014, arXiv:1401.8048v1 [physics.hist-ph]

avec un nombre supérieur de dimensions spatiales. Aucun observateur ne pourra nous dire quel est le nombre réel de dimensions spatiales de notre Univers, puisqu'aucun d'eux n'a un outil de perception adapté. Il serait théoriquement possible que ces dimensions supplémentaires existent de façon observable, mais qu'aucun de nos sens ne soient adaptés pour leur observation, ou bien qu'elles soient trop petites pour être perçues comme les supposées dimensions « enroulés » de la théorie des cordes[103] ? Comment savoir si ces dimensions supplémentaires pourrait faire partie intégrante de notre quotidien ? Notre unique possibilité, est d'envisager cette hypothèse, de la conceptualiser et de chercher une expérimentation directe ou indirecte permettant de mettre en évidence ces dimensions supplémentaires ou l'un de leurs effets. Autrement comment objectivement accepter l'idée selon laquelle il existerait dans notre Univers plus de trois dimensions spatiales.

La description de la réalité par les lois quantiques se heurte également à de grandes difficultés liées elles aussi à la faible perception de notre environnement. Devant la difficulté de visualiser la physique quantique par des images prélevées sur notre quotidien issues de nos perceptions sensorielles, d'avoir une image intuitive des phénomènes et de leur réalité, beaucoup de mathématiciens, physiciens ou philosophes, se sont demandé si finalement le statut de la Réalité ne devait pas être reconsidéré lui aussi.

Les apparences de la réalité macroscopique traduisent le microscopique : une onde tridimensionnelle qui traverse un film polarisant par exemple est une superposition de plusieurs plans de polarisation. Tant que la mesure n'est pas réalisée, tous les plans existent-ils ? Mais au nom de quel principe pouvons-nous affirmer que l'observable macroscopique est synonyme de la réalité ? Dirac lui-même doutait de la mécanique quantique quand il écrivit :

« *De grandes difficultés existent avec la mécanique quantique actuelle. [...] Je pense [...] que dans l'avenir il pourrait y avoir un retour au déterminisme...* ».

Les lois physiques, le concept d'espace-temps par exemple et le principe d'irréversibilité temporel existant à travers nos données théoriques nous voilent la réalité. Tout ce que l'on peut dire c'est que les règles opératoires du formalisme physique ne sont pas la réalité ; le fait de connaître les étapes d'une manipulation ne prouve pas que vous compreniez l'expérience. La réalité n'est donc probablement pas « visible » en soi, mais certains de ses effets le sont. La réalité indépendante n'est pas accessible, elle reste masquée. Comme le soutient Bernard d'Espagnat[104] :

« *Je constate que, jusqu'ici du moins, la physique n'a pas été capable de construire une description complète de l'expérience humaine [...] elle entraîne l'idée que le réel est voilé c'est-à-dire connaissable seulement en certaines de ses structures sans que, de plus, nous puissions dire exactement lesquelles de ces structures le sont* ».

Le réel est-il physique ou non physique ? Est-il dans sa totalité descriptible, par le moyen d'une science exacte ? De nombreux philosophes ne le pensent pas, mettant en avant l'argument qu'un système ne peut être compris de l'intérieur.

« Doit-on conclure avec Berkeley et Hume que nos concepts ne reflètent pas la réalité en soi, laquelle est inconnaissable, ou même que ce concept de réalité indépendante de l'observateur n'a aucun sens ? Il nous semble impossible d'aller jusque-là, car si les concepts dont nous nous servons sont bien intersubjectifs, cela ne signifie pas qu'ils sont arbitraires. Leur définition est au contraire fortement contrainte par l'expérience. (…) Devant ce problème, diverses attitudes ont été prises par les philosophes ; on peut les classer schématiquement de la manière suivante :

[103] Veneziano G., 2005, gravitation, relativité, mécanique quantique : la grande synthèse est-elle proche ?, Fayard

[104] Robert J.-D., 1988, Approches des positions de Bernard d'Espagnat dans une incertaine réalité. Laval théologique et philosophique, 44 (1), 31–57. https://doi.org/10.7202/400358ar

L'idéalisme considère que seules les idées ont une réalité, et que nos perceptions ne sont que des apparences plus ou moins illusoires ;

L'empirisme s'intéresse exclusivement aux phénomènes qu'il considère comme seul réel digne de ce nom ; il peut aller jusqu'à nier l'existence d'une réalité indépendante de l'observateur,

L'attitude critique distingue une réalité phénoménologique accessible à notre connaissance, et une réalité en soi considérée comme inconnaissable ;

Le réalisme qui considère que les découvertes de la science représentent véritablement la réalité, avec une précision sans cesse croissante.

Telle était la situation au début du 20ème siècle, dans un contexte où les sciences étaient considérées comme une des parties e la philosophie. »[105]

La représentation des particules tantôt par des ondes, par exemple dans les phénomènes d'interférences, tantôt par des particules, par exemple dans l'effet photo-électrique, est la preuve que la réalité de ces objets microscopiques échappe à notre compréhension. Pour expliquer les résultats des phénomènes observés nous sommes donc contraints de renoncer à les considérer comme ayant une existence propre ; elles sont plus des apparences momentanées qui ne peuvent en aucun cas être considérés comme la Réalité fondamentale, mais plutôt comme une manifestation de quelque chose décrit par des modèles mathématiques contingents mais non directement observables et ainsi hors de notre entendement.

Ainsi le concept de masse, bien qu'expliqué aujourd'hui par les physiciens comme une conséquence de l'interaction entre deux champs, l'un décrivant les particules composant le corps étudié, l'autre une propriété du vide traduisant sa capacité à transférer de l'énergie aux particules sous forme potentielle, la nature de la masse, reste profondément incomprise. Lier ce concept à la constante de Planck, quantum d'action revient à lier un concept d'objet pour lequel encore plusieurs questions restent ouvertes avec une constante dont la nature profonde nous échappe. La question reste donc ouverte.

Le choix de la constante fondamentale référence du kilogramme

Jusqu'au milieu du 20ème siècle, la définition de l'unité du kilogramme, matérialisée par un artefact, un cylindre de platine iridié, était suffisante pour tous les besoins industriels. Les demandes de précision les plus exigeantes provenaient principalement d'un petit nombre de domaines scientifiques : la chimie, l'électronique naissante des semi-conducteurs, la mécanique de précision, l'optique. La chimie, notamment le domaine pharmaceutique[106], requérait des précisions dans la mesure des masses relevant des microgrammes ; en électronique, les premiers composants utilisant la technologie des semi-conducteurs commençaient à se développer[107] rapidement et étaient utilisés par de plus en plus de secteurs de l'industrie (communication, systèmes militaires, radars, asservissement des moteurs électriques) ; quant à la mécanique de précision, elle tenait une place importante dans le soucis constant des industriels de miniaturiser

[105] Theoblad C., Saugier B., Leroy J., Le Maire M., Gresillon D., 2006, L'Univers n'est pas sourd, Bayard , p 45

[106] Au début du XXe siècle, il n'y avait qu'une douzaine de molécules chimiques avec une centaine de produits naturels alors qu'au début du XXIe siècle, nous avons plusieurs centaines de molécules chimiques ; La balance la plus sensible au monde, créée en 2012 par des chercheurs de l'Institut Catalan de Nanotechnologie, permet de peser au yoctogramme près : Moonzur Rahman, « La balance la plus sensible au monde : peser au yoctogramme près » [archive], sur techniques-ingenieur.fr, 13 avril 2012.

[107] En 1952, l'entreprise Intermetall créée par Herbert Mataré est la première à produire des transistors qui un an plus tard fabriquera la première radio à transistor, un an avant celle de Texas Instrument.

des mécanismes de plus en plus sophistiqués (horlogerie[108] de luxe, asservissement des moteurs, machines-outils[109] capables de réaliser des pièces avec une grande précision, …). Tous ces besoins du monde économique restaient relativement limités, rendant encore suffisant l'étalon métallique déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres, au BIPM. Alors pourquoi changer de définition, renoncer à utiliser cet étalon de masse ? La principale raison nous semble bien être une accélération du développement technologie, principalement l'apparition celle des lasers[110] et la complexification des circuits électroniques[111] poussant les industriels à toujours plus d'intégration, de miniaturisation des composants.

Plusieurs options s'ouvraient aux physiciens et métrologues pour définir l'unité de masse :

Le choix d'une masse de référence prise dans le monde des particules élémentaires,

L'utilisation de l'onde pilote découverte par de Broglie théorie selon laquelle une onde est associée à tout corps en mouvement et dont la fréquence est directement fonction de la masse de ce corps pour mesurer le rapport h/m d'une particule, théorie qui avait été absorbé par la mécanique quantique en modifiant da nature, en la remplaçant par le concept de fonction d'onde,

La définition du kilogramme comme une fonction d'une ou plusieurs constantes fondamentales reconnue comme telle par l'ensemble des communautés scientifiques et industrielles, et par le CODATA[112].

Définir le kilogramme unité par rapport à la masse d'une particule élémentaire a été un choix envisagé pendant un temps par les physiciens jusqu'au début des années 1980. Mais, plusieurs difficultés techniques et conceptuelles ont contraint physiciens et métrologues à abandonner cette voie de recherche et à privilégier le choix d'une constante fondamentale comme référence. Quelles sont les principales raisons de cet abandon ?

Utilisation de la masse d'une particule comme unité

En premier lieu, la mesure directe de la masse d'une particule est technologiquement délicate ; on ne peut concevoir une balance de précision pour « peser » une particule. Toutes les technologies de la seconde partie du 20ème siècle, et même celles dont nous disposons maintenant, ne nous permettent pas une mesure directe de la masse d'une particule, comme par exemple celle d'un électron, avec une précision compatible avec les nécessités métrologiques. On ne peut que mesurer des rapports dans lesquels interviennent ces masses et d'autres caractéristiques liées à ces mêmes particules comme dans les chambres à brouillard inventée par Wilson en 1911 puis modifiée en chambre à bulles conçues, elles, par Donald A. Glaser en 1952. Avec cette technologie les physiciens ont pu mesurer le rapport e/m_e en soumettant les particules chargées (la quasi-totalité des particules connues à l'exception du photon, la famille des neutrinos et certains gluons), à un champ magnétique B orthogonal au plan de leur vitesse de déplacement. La courbure R de la trajectoire ainsi obtenue est directement liée à la masse m de la particule chargée :

$$R = m\frac{v}{B}$$

[108] Apparition des premières montres à tourbillons développées par l'industrie horlogère Suisse de la vallée de Joux

[109] Bruno Jacomy, 1990, Une Histoire des Techniques, éd. le Seuil

[110] En mai 1960, Theodore Maiman décrit le fonctionnement du premier laser à rubis, CNRS Le journal, n° 243, avril 2010

[111] En 1958, l'Américain Jack Kilby invente le premier circuit intégré

[112] Comité de données pour la science et la technologie (ou CODATA), créé en 1966, est un comité interdisciplinaire du Conseil international pour la science (ICSU) ; CODATA préconise une liste de valeurs des constantes physiques fondamentales. Il y a déjà eu sept publications, en 1973, 1986, 1998, 2002, 2006, 2010, 2014 et 2018

Le premier à avoir réalisé cette mesure du rapport e/m_e est J. J. Thomson en 1897 en utilisant une méthode électrochimique[113]. Cependant quels que soient les dispositifs utilisés (chambres à brouillard ou à bulles, dispositifs électrochimiques, ou par des techniques plus récentes comme la déviation par un champ électrique associé à un filtre à fils[114]), les valeurs mesurées de ce rapport e/m_e ne peuvent dépasser une précision de 10^{-8}. Les métrologues estiment que cette précision ne semble guère pouvoir être améliorée même en utilisant les technologies modernes adaptées à cette méthodologie de mesure ; cette impossibilité a, selon eux, pour origine principale des erreurs inhérentes à l'homogénéité des champs magnétiques et à la précision de fabrication des pièces mécaniques. Même s'il avait été possible de mesurer la masse d'une particule pouvant être envisagée comme une référence de masse, par exemple celle de l'électron, raccorder cette masse unité microscopique avec le monde macroscopique aurait représenté un second obstacle et aurait conduit nécessairement à la réalisation d'un artefact du kilogramme contenant un nombre précisément déterminé d'atomes d'un même type en utilisant la définition d'une mole :

« Il serait bien plus satisfaisant de partir de la masse d'une particule microscopique (électron ou atome) a priori parfaitement reproductible et de remonter à l'échelle macroscopique. Mais si les masses se comparent très bien entre elles à l'échelle macroscopique ou à l'échelle atomique, toute la difficulté réside dans le raccordement de ces deux échelles. Pour faire ce lien, il faut en effet réaliser un objet dont le nombre d'atomes soit connu et dont la masse puisse être comparée à celle du kilogramme étalon. Ceci revient à déterminer le nombre d'Avogadro N_A qui définit la mole. La mole est une quantité d'objets microscopiques définie comme un nombre conventionnel d'entités identiques. Ce nombre sans dimension a été choisi arbitrairement égal au nombre d'atomes, supposés isolés, au repos et dans leur état fondamental, contenus dans 0,012 kg de carbone 12. C'est donc, à un facteur numérique 0,012 près, le rapport sans dimension de la masse du kilogramme étalon à la masse de l'atome de carbone. La constante d'Avogadro N_A désigne généralement ce même nombre rapporté à une mole et elle est exprimée en mol^{-1}. Ce nombre et cette constante ne sont ni plus ni moins qu'une autre façon d'exprimer la masse de l'atome de carbone ou son douzième, qui est l'unité de masse atomique unifiée mu. Il existe un programme international pour la détermination du nombre d'Avogadro à partir de la connaissance d'une sphère de silicium sous tous ses « angles » (caractéristiques physiques de dimension, masse, volume de la maille, composition isotopique, état de surface, etc.). Ce programme a rencontré et déjà surmonté de nombreuses difficultés et pourrait un jour aboutir à une détermination du nombre d'Avogadro avec une exactitude compatible avec une redéfinition du kilogramme. Celui-ci serait alors défini, en fixant le nombre d'Avogadro, à partir de la masse d'une particule élémentaire, de préférence celle de l'électron. »[115]

Adopter une définition de la masse macroscopique à partir de la masse d'une particule microscopique comme celle de l'électron ou du proton, considérées comme des constantes fondamentales, c'est également faire référence à la constante d'Avogadro dont il est nécessaire de mesurer la valeur avec un degré de précision compatible avec la précision désirée pour l'unité de masse. Cette unité serait alors définie à partir de deux constantes : la masse d'une particule élémentaire de référence et le nombre d'Avogadro. Ce choix supposait :

De lier le statut de constantes fondamentales aux masses des particules élémentaires par l'intermédiaire de la constante d'Avogadro,

[113] Thomson J. J., 1897, Cathode rays, Philosophical Magazine, 44, 293

[114] Delon P., 1979, thèse de doctorat, processus de dissociations dans les molécules diatomiques, Université Paris 6

[115] Bordé C., 2007, la lettre de l'académie des sciences n°20

De pouvoir technologiquement mesurer les valeurs numériques de ces constantes avec une précision compatible envers les objectifs fixés pour une utilisation pratique de l'unité de masse par l'ensemble des acteurs du monde économique,

Et enfin de disposer d'instruments de mesure permettant d'atteindre une précision de mesure suffisante pour compter le nombre de particules dans l'artefact représentant l'unité de masse macroscopique.

Si les deux premières conditions ne posaient a priori pas de problèmes majeurs, le comptage des particules d'une masse microscopique composée d'atomes, donc de protons, de neutrons et d'électrons, en termes de nombre de masses d'électrons présentait de nombreux défis technologiques excluant les capacités dont disposaient la grande majorité des laboratoires internationaux publics ou privés.

Durant la même période, apparaissaient deux autres voies de recherche : la mesure de la masse par la mesure du rapport h/m et la mesure directe du kilogramme par une balance d'un type nouveau, la balance du Watt, conçue par Kibble en 1975. La possibilité de mesurer le rapport h/m pour un objet quelconque, qu'il soit macroscopique ou microscopique est une conséquence directe du travail de L. de Broglie dans le cadre de son travail de doctorat[116]. Il y démontre qu'à tout objet de masse m en mouvement avec une vitesse v est associé une onde, dont la nature reste inconnue, et la fréquence f est définie par la relation :

$$f = \frac{mvc}{h}$$

Selon son interprétation, cette onde est une onde de phase qui se déplace à une vitesse supérieure à celle de la lumière. De cette expression il est possible de déduire que l'énergie associée à cette onde :

$$E = hf$$

Conduit à une autre expression :

$$E = mvc$$

Qui est l'énergie cinétique, selon la théorie de la relativité d'Einstein, associée à tout objet animée d'une vitesse v de déplacement. Il devenait donc possible pour les métrologues de réaliser des mesures de masses à partir de phénomènes d'interférences générés par des jets d'objets massiques comme des particules ou des molécules. Ces mesures interférométriques pouvaient conduire à une mesure du rapport h/m[117], m étant la masse de l'objet ou de la particule utilisé.

Dans le courant des années 1980, les dispositifs de mesure du rapport h/m de ces deux grandeurs, la constante de Planck h, et m, la masse d'une particule, vont atteindre une maturité technologique suffisante pour conduire à des précisions de mesure supérieures à 10^{-9}. Les premières technologies de mesure du rapport h/m étaient apparues dans les années 1960 d'abord avec l'apparition des masers[118], puis celle des premiers lasers[119]. D'autres mesure furent faites en utilisant des paires dites de Cooper générées lors de transition normale-supraconductrice de certains métaux[120] [121]. Au cours de la vingtaine d'années qui ont suivi l'apparition de ces technologies, de très rapides progrès ont été faits sur la stabilisation des

[116] De Broglie L., 1923, Ondes et quanta, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 2, 507.

[117] Bordé C., Courtier N., du Burck F., Goncharov A. N., Gorlicki M., 1994, Molecular Interferometry Experiments, Physics Letters A188, 187-197.

[118] Bordé C., C.J. Ch. J. BORDÉ, A. HENRY et L. HENRY, Emission du gaz ammoniac excité par le rayonnement d'un laser à gaz carbonique, C.R. Acad. Sc. Paris, 262B, 1389-1390 (1966).

[119] Christian J. Bordé, Matter-wave interferometers: a synthetic approach, in Atom Interferometry, ed. P. Berman, Academic Press (1997).

[120] J. E. Zimmerman and J. E. Mercereau, 1965, Compton wavelength of superconducting electrons, Phys. Rev. Lett. 14, 887-888.

[121] W. H. Parker and M. B. Simmonds, Measurement of h=me using rotating superconductors, in Precision Measurement and Fundamental Constants, NBS Special Publication 243-247 (1971).

sources d'ondes électromagnétiques afin de pouvoir les utiliser dans des dispositifs d'interférométrie où les physiciens savaient qu'ils représentaient la meilleure technologie de mesure de grandeurs. Ramener cette mesure du rapport h/m à celle de l'interfrange d'un phénomène d'interférence entrainait l'obtention d'une précision satisfaisante, dont le niveau pouvait être amélioré par l'utilisation des techniques de l'optique classique.

C'est à partir de cette époque que physiciens et métrologues ont pris conscience de l'utilité des technologies optiques reposant sur ces sources ultra-stables qu'ont d'abord représentées les masers, puis les lasers. L'universalité de ces techniques d'interférences optiques est telle que certains physiciens les qualifieront de « lumière pour explorer les quatre infinis »[122] :

L'infiniment petit et la plus haute résolution spatiale : l'angle solide occupé par un faisceau laser peut-être élargi sans perte de cohérence spatiale, de sorte que la surface de la tache focale peut être réduite à λ2, ce qui correspond à une focalisation extrême. C'est la limite de résolution décrite par Ernst Abbe en 1873 puis raffinée par Lord Rayleigh en 1896,

L'infiniment grand et l'exploration de notre Univers par les astronomes : à l'inverse, augmenter le diamètre d'un faisceau permet de réduire sa divergence et de résoudre angulairement des points sources très éloignés. C'est toute la démarche des astronomes lorsqu'ils augmentent la taille de leurs télescopes, organisent leur mise en phase ou corrigent les fronts d'onde grâce à l'optique adaptative. La cohérence spatiale des faisceaux lumineux est ici encore le facteur primordial,

L'infiniment court et la plus haute résolution temporelle : augmenter la largeur spectrale d'une source cohérente permet de fabriquer des impulsions de plus en plus courtes. C'est la démarche qui nous est proposée par Daniel Kaplan, avec les lasers femtosecondes, et par Anne L'Huillier, pour voir la dynamique interne des atomes au moyen des impulsions de lumière attosecondes. Les impulsions courtes donnent accès aux grandes puissances instantanées et à bien des applications : l'optique non linéaire, la génération d'harmoniques et les mélanges de fréquences, l'accélération de particules chargées par la lumière, etc,

L'infiniment long et le temps atomique : la largeur spectrale des lasers peut au contraire être extraordinairement réduite pour obtenir un rayonnement quasi monochromatique dont la phase temporelle se conserve sur des durées extrêmement longues. La fréquence peut être facilement asservie à une fréquence atomique parfaitement stable et reproductible, et constituer ainsi une horloge optique très stable. »

Il est important de rapprocher cet intérêt accru pour les progrès technologiques avec l'évolution des idées politiques en faveur de la recherche. Au sortir de la seconde guerre mondiale, le gouvernement américain[123] considérait qu'il était primordial de laisser un maximum de liberté aux chercheurs, de ne pas leur imposer de direction de recherche, de leur consentir un financement suffisant afin qu'ils puissent suivre librement leurs intuitions et mener les recherches qu'ils jugeaient nécessaires dans la direction qu'ils considéraient comme prometteuse. Cette politique va effectivement porter ses fruits et conduire à d'immenses progrès dans divers domaines scientifiques, qui eux-mêmes vont avoir d'importantes retombées technologiques donc économiques en confortant la place des états unis en tant que première puissance mondiale.

Vers les années 1970, la situation changea[124] fortement, à cause de la guerre froide principalement, mais aussi par la montée en puissance du Japon et l'émergence de l'Europe et

[122] Bordé C., 2015, lettre à l'académie, http://christian.j.borde.free.fr/LettreAcad_CB.pdf

[123] Paraskevas CARACOSTAS & Ugar MULDUR, 1997, Society, The Endless Frontier, A European Vision of Research and Innovation Policies for the 21st Century, Brussels, European Commission

[124] Vidal Chloë, On la prospective territoriale, representing an encounter between the principles of foresight and those of regional development, see the reference to the DATAR international conference in March 1968. Chloë VIDAL, La prospective territoriale dans tous ses états, Rationalités, savoirs et pratiques de la prospective (1957-2014)…, p. 214-215

de la Chine comme puissances économiques concurrentes. Il apparut ainsi que financer des recherches non dirigées conduisaient peut-être à des retombées économiques intéressantes, mais pas de façon assez rapide. La doctrine changea donc et il fut décidé que les financements ne devaient se faire que sur des projets garantissant des retombées économiques à court termes et non à des échéances lointaines et souvent incertaines et avec une rentabilité vérifiée. Les crédits de recherche furent majoritairement délégués au secteur privé. Cette idée de financement sélectif de la recherche s'est également installée en Europe[125] dès les années 1990, conduisant à une raréfaction des crédits d'états de la recherche fondamentale et une augmentation de ceux qui visaient des projets présentant des objectifs industriels ou avec de fort développement technologique. Ce fut par exemple le cas du domaine de l'exploration et de l'instrumentation spatiale qui, outre l'ouverture de marchés potentiels sur les richesses d'objets proches de la Terre, nécessite, pour être réalisé, le développement préalable de nouvelles technologies aux retombées multiples pour l'économie. Les économistes estiment que dans ce domaine, un euro investi entraîne en moyenne un euro quatre-vingt de chiffre d'affaire en retour pour le monde industriel.

Ces doctrines politiques libérales ont ainsi fortement contribué aux développements technologiques qui eux-mêmes, par la mise au point de nouveaux dispositifs de métrologie, ont rendus possible la redéfinition des unités de mesure à partir des constantes fondamentales, grandeurs offrant une stabilité de valeur numérique spatiale et temporelle ainsi qu'une liberté suffisante aux acteurs du monde économique dans l'interprétation et l'utilisation de la définition des unités. C'est ainsi que le choix de la masse de l'électron, outre la difficulté de sa mesure avec une précision élevée, ne pouvait pas satisfaire aux critères requis de retombées économiques et ne pouvait donc être choisi.

Il pouvait pourtant sembler satisfaisant de partir de la masse d'une particule microscopique (électron ou atome), a priori parfaitement reproductible, et de remonter à l'échelle macroscopique. Mais si les masses se comparent très bien entre elles à l'échelle macroscopique ou à l'échelle atomique, toute la difficulté réside dans le raccordement de ces deux échelles de grandeurs. Pour faire ce lien, il faut être capable de réaliser un objet dont le nombre d'atomes soit connu, mesuré, et dont la masse puisse être comparée à celle du kilogramme étalon. Ceci revient à déterminer et fixer conventionnellement la valeur numérique du nombre d'Avogadro N_A qui définit la mole.

La mole est une quantité d'objets microscopiques définie comme un nombre d'entités identiques. Ce nombre contingent, sans dimension, a été choisi arbitrairement égal au nombre d'atomes, supposés isolés, au repos et dans leur état fondamental, contenus dans 0,012 kg de carbone 12. C'est donc, à un facteur numérique 0,012 près, le rapport sans dimension de la masse du kilogramme étalon à la masse de l'atome de carbone. La constante d'Avogadro N_A désigne généralement ce même nombre rapporté à une mole, et elle est exprimée en mol^{-1}. Ce nombre et cette constante ne sont ni plus ni moins qu'une autre façon d'exprimer la masse de l'atome de carbone ou son douzième, qui est l'unité de masse atomique unifiée. L'académie des sciences va s'emparer de cette question :

« La notion de masse ne se réduit pas à celle de quantité de matière et, redéfinir l'unité de masse à partir de la masse d'une particule élémentaire de référence, va certainement dans la direction souhaitée mais ne permet pas de faire passer le rasoir d'Occam et de réduire le nombre d'unités indépendantes. Or, il est possible, comme dans le cas du mètre, de relier l'unité de masse à l'unité de temps. En effet, la théorie de la relativité nous permet d'interpréter la masse m d'un objet comme son énergie interne, donnée par la fameuse relation $E = mc^2$*. Par ailleurs, Louis de Broglie dans sa célèbre Note de 1923 nous enseigne que cette énergie peut*

[125] CLAR Günter & Philippe DESTATTE, Regional Foresight, Boosting Regional Potential, Mutual Learning Platform Regional Foresight Report, Luxembourg, European Commission, Committee of the Regions and Innovative Regions in Europe Network, 2007

être associée au temps propre τ de l'objet pour donner la phase d'une oscillation interne. Le produit mc²τ de ces deux quantités est une action, qui doit donc être rapportée à une action élémentaire, la constante de Planck h, pour donner la phase sans dimension de cette onde mc²τ /h. En d'autres termes la quantité $\frac{mc^2}{h}$ *est une fréquence que nous désignerons par le nom de fréquence de de Broglie–Compton (dBC). Cette fréquence est mesurable directement dans le cas de particules microscopiques telles que les atomes ou les molécules par les techniques modernes d'interférométrie atomique dans lesquelles on fait précisément interférer les ondes de de Broglie entre elles. Cette mesure se fait aujourd'hui avec une incertitude relative inférieure à* 10^{-8}*. Partant de là, on peut par simple multiplication par le nombre d'Avogadro* N_A *remonter à la fréquence de de Broglie–Compton du kilogramme : et relier ainsi l'unité de masse à celle de temps. L'unité de masse serait alors définie en fixant cette fréquence, ce qui revient à fixer la constante de Planck*[126]*. »*

Le groupe de travail de l'académie des technologies va alors rédiger un rapport sur l'état de la métrologie et publier les recommandations qu'ils proposent à l'intention du CIPM en 2005[127] :

« Rapport - 17 mai 2004-En 1996, le rapport de l'Académie des Sciences-CADAS intitulé "Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIème siècle" présentait l'état de la métrologie en France vers 1995. Mais depuis 8 ans, la métrologie a ajouté à son utilité industrielle et commerciale une dimension sociétale nouvelle, ce qui justifie ce nouveau rapport. On rappelle d'abord comment la métrologie garantit la qualité des mesures grâce à leur traçabilité vers des références nationales, dont l'équivalence internationales est assurée par des comparaisons avec le BIPM et les autres laboratoires nationaux de métrologie. Tout en étant toujours fondamentalement liée à l'industrie et au commerce, la métrologie doit aussi contribuer, et de plus en plus, à satisfaire les besoins des populations, notamment dans les domaines de l'alimentation, de la sécurité, de la santé et de l'environnement. La métrologie, c'est donc aussi un effort ininterrompu, pour s'adapter aux besoins croissants d'exactitude et d'extension vers de nouveaux domaines d'application. Dans un premier chapitre, on présente les unités de base du système international d'unités (SI). On indique à chaque fois ce qui est nouveau et quelle serait l'évolution prévisible dans le futur avec les applications attendues, impliquant généralement de grands efforts de R&D. Il apparaît comme particulièrement regrettable qu'à la qualité de la métrologie fondamentale en France ne corresponde ni un développement en aval des industries des appareils de mesure, ni une politique scientifique coordonnée en amont de la métrologie. Puis diverses applications de la métrologie sont passées en revue en décrivant l'état actuel des besoins présents et futurs et les travaux à entreprendre dès maintenant pour les satisfaire. Pour l'industrie, pour les nouvelles technologies, les sous-traitances, les normes de plus en plus sévères, l'obligation de qualité et l'établissement de la conformité des produits sont demandeurs de métrologie de plus en plus exacte. La chimie, où la métrologie a été trop longtemps négligée, a ses difficultés propres liées aux prélèvements, à la diversité des éléments, à l'insuffisance des matériaux de référence certifiés, et surtout, au manque d'esprit métrologique de la profession. Dans le domaine de la santé, qu'il s'agisse des effets des rayonnements ionisants ou des analyses biologiques, le gros problème est que même les exactitudes en métrologie primaire et la qualité ultime des matériaux de référence atteignent à peine les besoins courants de la thérapie ou de la sécurité. Enfin, pour l'environnement, les domaines à considérer sont très variés et, relevant essentiellement de la chimie, souffrent des mêmes difficultés. Les chapitres suivants traitent des bases légales de la métrologie et de la

[126] Bordé C., 2007, La réforme du système d'unités Allons-nous vers une redéfinition des unités de base a partir des seules constantes fondamentales, la lettre de l'académie des sciences n°20

[127] *Rapport - 17 mai 2004* - En 1996, le rapport de l'Académie des Sciences-CADAS intitulé "Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIème siècle" présentait l'état de la métrologie en France vers 1995

responsabilité de l'État, de l'impact très positif de la métrologie sur l'économie, de la coopération internationale, notamment en matière de commerce international grâce à l'Arrangement de reconnaissance mutuelle et, enfin, de la formation en métrologie. Les recommandations sont nombreuses parce que, les applications de la métrologie étant très diversifiées, il a fallu mettre en évidence des problèmes spécifiques à chacun des domaines, en plus des recommandations générales sur la politique à mener en France pour la métrologie fondamentale, primaire et appliquée. Quinze annexes développent des points importants rencontrés dans le cours du rapport ou présentent des cas exemplaires destinés à illustrer le propos général. »

En définissant une masse par une autre, est apparu aux métrologues du milieu du 20ème siècle une nouvelle difficulté de nature conceptuelle et qui concernait les théories physiques modernes : en procédant de cette manière, on oblitère la question de la nature de la masse, essentielle à l'élaboration d'une définition de cette unité rattachée aux théories physiques connues les plus fondamentales et à partir desquelles il est possible de fournir un modèle de notre Univers. L'utilisation de la masse d'une particule comme référence pour l'unité du kilogramme procède du même processus que de réaliser une pesée sur une balance à partir d'un ensemble de poids. Le résultat de la mesure ne nous dit rien sur la nature de la masse et son lien avec la Réalité. Dans une telle opération de pesée, on ne fait guère que comparer des grandeurs appartenant à un même ensemble dont on ne connaît rien sur leur nature.

La seconde est définie, elle, à partir d'une fréquence liée à un saut quantique bien défini mais incomplètement compris, le mètre fait référence au temps de vol d'un photon sur une durée donnée. Aucune de ces deux unités primaires ne fait référence à une grandeur de même nature que l'unité de mesure à laquelle elle se rattache ; le mètre n'est plus défini par rapport à une longueur d'onde ; la seconde, bien que liée à une fréquence n'est pas établie par comparaison de durées mais par comptage d'un certain nombre de périodes d'oscillations d'une onde résultant d'une transition quantique particulière.

La mécanique quantique interprète la masse comme une grandeur liée au concept de vide et de la description des objets constituant le monde par des champs quantiques, une caractéristique liée à l'interaction d'un champ quantique représentant l'élément de matière considéré, une particule, avec un champ scalaire du vide, une caractéristique intrinsèque du concept de vide. Mais l'équivalence de cette mase avec l'énergie est définie par la théorie de la relativité qui prédit sa capacité à courber localement l'espace-temps. Ainsi la masse n'est pas décrite par un même concept dans les deux théories fondamentales de la physique actuelle. Vouloir définir l'unité de masse par comparaison entre une masse macroscopique, un ensemble d'atomes, et une particule élémentaire, l'électron, c'est accepter cette ambiguïté dans la définition d'une masse. Si l'on ajoute à ce constat la question ouverte de l'identification d'une masse avec une quantité de matière, on comprend les objections à ce choix pour la définition du kilogramme. Pour toutes ces raisons, les scientifiques et les métrologues vont abandonner l'idée de définir le kilogramme à partir de la masse d'une particule élémentaire comme l'électron.

Alors comment définir l'unité de masse ? Quelle référence choisir si l'on s'interdit d'utiliser une masse de particule élémentaire au repos ? Le choix qui devait être fait avait l'obligation de prendre en compte deux impératifs :

Faire référence à l'une des deux grandes théories fondamentales de la physique, la relativité et la mécanique quantique,

Permettre une mise en pratique compatible avec le caractère macroscopique de l'unité de masse, le kilogramme.

Relier une unité de mesures à une constante fondamentale, c'est choisir de la relier à une réalité plus profonde plus fondamentale, c'est donc à la fois le souci de pérenniser dans la durée l'unité de mesure et sa grandeur mais aussi la mise en évidence d'un lien la reliant à une ou plusieurs théories fondamentales représentatives des lois de la nature via cette constante.

Définir une unité de mesure à partir d'une grandeur constante, une constante fondamentale, indépendante des théories physiques utilisées à un instant donné, permet de rattacher cette unité à une réalité plus fondamentale que celle décrite par les théories existantes qui ne sont qu'un aspect limité des lois Universelles de la Nature et ont une validité limitée temporellement. C'est attribuer à cette unité un caractère ontologique.

Les technologies modernes permettent la mesure des valeurs numériques de ces constantes fondamentales avec une précision compatible avec les objectifs requis par les utilisateurs finaux, les laboratoires de recherches et les industriels. Quelle constante choisir pour cette unité de masse ? La vitesse de la lumière, la fréquence de l'onde lumineuse associée à un saut quantique, la constante de Boltzmann, la charge élémentaire de l'électron et le nombre d'Avogadro avaient déjà été choisis pour les autres unités du SI. Par ailleurs, cette liste de constantes déjà utilisées faisait référence aux seules théories de la relativité et de la physique statistique si l'on ne considère pas la fréquence de l'onde émise lors d'un saut quantique comme une constante fondamentale devant satisfaire les conditions du classement de Levy-Leblond. Il était donc politiquement important de pouvoir utiliser au moins une constante fondamentale rattachée à la mécanique quantique.

La proposition, finalement abandonnée, de choisir l'unité de masse parmi les masses des particules élémentaires va conduire physiciens et métrologues vers le choix de la constante de Planck h dont l'existence est une conséquence des hypothèses sur lesquelles reposent la mécanique quantique. Cette constante, qui a la dimension d'une action, contrairement à toute attente va s'avérer féconde pour l'élaboration d'une nouvelle définition de la masse ; en effet à partir de cette constante plusieurs possibilités s'offraient pour définir le kilogramme :

Une première direction consistait à concevoir un dispositif permettant la comparaison d'une masse avec celle de référence définie théoriquement en utilisant une constante fondamentale h de référence : c'est le dispositif de la balance du watt sur laquelle nous allons revenir plus loin,

Une seconde consistait à concevoir un artefact représentatif de ce kilogramme et qui présentait l'avantage de pouvoir être défini par un nombre connu et mesurable d'atomes d'un type également prédéterminé : c'est la définition du kilogramme reposant sur la mesure de la constante d'Avogadro et la fabrication d'une sphère d'un isotope de silicium comportant un nombre connu d'atomes ordonnés selon une structure cristalline homogène,

Enfin une dernière direction, encore en développement à ce jour, qui repose sur la mesure du rapport h/m pour un type d'atome donné ; cette méthode présente la double possibilité d'une part de mesurer la masse atomique d'un atome ou d'une molécule connaissant la valeur de la constante h, et d'autre part de donner une valeur à h si l'on connaît la masse atomique de l'atome utilisé pour la mesure du rapport h/m. Cette voie bien que prometteuse n'a pas encore reçu une complète validation des différents acteurs intervenant dans l'élaboration et l'évolution du système des unités de mesure malgré le soutien appuyé de certains scientifiques reconnus[128].

La masse définie comme un ensemble dénombrable d'un même type d'atomes

La méthodologie mettant en œuvre la seconde possibilité repose sur la technologie de la spectroscopie par rayons X, dénommée par l'acronyme XRCD. Le principe en est simple : un volume d'une même matière, par exemple une sphère de métal fabriquée en veillant à ce que tous les atomes soient rangés de façon régulière et homogène afin de former un monocristal, et que tous ces atomes soient d'un même type d'élément et un même isotope. En pratique physiciens et ingénieurs savent qu'un tel objectif est inatteignable mais qu'il est possible de s'en rapprocher suffisamment pour atteindre le degré de précision requis par les métrologues.

[128] Bordé C. J., 2016, congres international de la mesure, Paris ; The reform of the International System of Units (SI), Philosophical, Historical and Sociological Issues, Edited by Nadine de Courtenay, Olivier Darrigol and Oliver Schlaudt, Routledge, London, 2019

Cette seconde méthode repose donc sur la mesure précise de la constante d'Avogadro N_a. Cette constante, qui est contingente, car créée de toute pièce par l'homme pour lui faciliter l'énoncé de lois et les calculs en chimie (elle a été proposée par Avogadro dès 1811), est définie actuellement comme le nombre d'atomes contenu dans exactement 12 g de carbone. Toutes les différentes mesures de sa valeur ont été assorties d'une faible précision jusqu'à l'apparition des technologies de diffraction par rayons X dans les années 1970. Mais même avec cette technologie de diffraction, le taux d'impuretés et les défauts de cristallisation, la précision atteinte n'était pas suffisante pour attirer l'intérêt des métrologues. Ce n'est qu'avec les technologies développées par les industries de la micro-électronique, notamment celles dédiées à la fabrication des substrats destinés aux microprocesseurs à partir des années 1990 que les ingénieurs ont acquis une maîtrise suffisante des techniques de réalisation de mono cristaux de silicium se rapprochant de l'objectif de précision requis[129].

La première étape de cette seconde méthode consiste à mesurer par diffraction les dimensions d'une maille du réseau atomique d'un monocristal de silicium. Dans une seconde étape on s'assure que la sphère ne contient pas un taux d'impuretés, principalement d'atomes correspondant à un autre isotope que celui choisi ou des atomes de carbone, d'oxygène et d'azote. On vérifie ensuite le taux de lacunes présents dans le réseau du monocristal de silicium.

Lorsque ce résultat est obtenu on détermine précisément le volume de cette sphère par des mesures interférométriques. De la connaissance de ce volume et de la taille de la maille unité on déduit le nombre d'atomes présents dans la sphère. Cette sphère est ensuite pesée par comparaison avec une réplique de l'artefact du kilogramme en platine iridié ce qui permet de calculer la masse atomique de l'atome de silicium. Cette valeur est enregistrée, par choix conventionnel, comme valeur de référence pour cet isotope du silicium. Une nouvelle sphère de silicium fabriquée, et dont les atomes seront comptés par diffraction X, conduira à un calcul de masse obtenu en multipliant la masse atomique de référence par le nombre d'atomes comptés.

A partir de la mesure de la constante N_a les métrologues peuvent calculer la valeur de la constante h et ainsi relier cette masse unité à cette dernière en utilisant la relation reliant ces deux constantes[130][131] :

$$h = \frac{c\, A_r(e) M_u \alpha^2}{2 R_\infty N_a}$$

Où $A_r(e)$ est la masse atomique de l'électron, R_∞ la constante de Rydberg, α la constante de structure fine, c la vitesse de la lumière dans le vide et M_u la constante de masse molaire.

Si l'on fixe de façon conventionnelle la valeur de la constante h obtenue par une mesure directe à partir du dispositif de la balance du Watt, ou si on la déduit de la valeur fixée conventionnellement de la constante d'Avogadro déterminée à partir d'une sphère de silicium, on constate une différence irréductible de 1.1×10^{-10}, et inexpliquée, entre les valeurs obtenues par les deux technologies.

Cette erreur systématique résulte de la comparaison des résultats de mesures obtenus par les deux différents dispositifs de mesures actuellement utilisés (la balance du Watt et la valeur exacte conventionnelle du nombre d'Avogadro par comptage des atomes d'une sphère de silicium 30 en utilisant les technologies de diffraction par rayons X (XRCD)). Le tableau ci-

[129] Bonse U and hart M, 1965, appl. Phys. Lett., 6 155-6

[130] Genevès G., Gournay P., Pinot P., Juncar P., Lecollinet M., Chassagne L., Clairon A., Landragin A., Holleville D., Pereira Dos Santos F., Besbes M., Alves F., Topçu S., Haddad D., Gosset A., Silvestri Z., Meury P.-A., Madec T., Macé S., 2007, Revue française de métrologie, n°9, Volume 2007-1

[131] Mohr P. J. et Taylor B. N., 2005, « CODATA recommended values on the fundamental physical constant and electron mass », Metrologia, 42, 431-441

dessous donne la synthèse des résultats[132], déjà mentionné plus haut, des plus récents obtenus par plusieurs organismes internationaux de métrologie :

organisme / année	valeur de h X 10^{-34}	erreur de mesure X 10^{-9}
NRC-17	6,626070133	9,1
NIST-17	6,626069934	13
LNE-17	6,6260704	57
NIST-15	6,62606936	57
IAC-17	6,626070405	12
IAC-15	6,62607022	20
NMIJ-17	6,62607013	24
IAC-11	6,62606994	30

Les quatre premières valeurs numériques correspondent à la mesure de la constante h en utilisant le dispositif de la balance du Watt, les quatre suivantes par la mesure préalable du nombre d'Avogadro. Les moyennes obtenues pour ces deux séries conduisent respectivement aux valeurs :

6,62606996 x 10^{-34} et 6,62607017 10^{-34} pour la valeur de la constante de Planck h. ces valeurs numériques sont suffisamment éloignées pour ne pas être comprises dans les valeurs d'erreurs résultantes de ces moyennes. Ainsi la mesure de la valeur de la constante h semble conduire à deux valeurs différentes selon la technologie choisie. Ce constat nous impose logiquement de conclure que :

Soit il existe une erreur systématique, un biais, dans les procédures de mesure réalisées à partir de l'une ou des deux méthodologies,

Soit ce sont les différences des technologies, reposant sur des théories physiques différentes, qui sont responsables de ces écarts de résultats.

L'écart de précision ou les méthodologies suivies sont-elles suffisantes pour expliquer les écarts entre les valeurs de la constante h par les deux méthodologies utilisées à ce jour ? Pour proposer une réponse à cette question les métrologues devront une réaliser une analyse précise des dérives engendrées, des biais possibles. À ce jour, la question de l'existence d'un biais dans l'une ou les deux méthodologies suivies pour mesurer la constante h reste une question ouverte.

Si la seconde possibilité s'avère l'explication correcte des écarts de valeurs mesurées pour la constante h, alors la définition du kilogramme à partir de la constante de Planck ne pourra être qualifiée de vraie car sa valeur va dépendre de la méthodologie choisie pour la mesure de la valeur de la constante h. Cette dépendance à une technologie de mesure serait, dans cette hypothèse, le reflet d'une théorie incomplète au sens que lui donnait Einstein dans son débat avec Bohr sur la complétude de la mécanique quantique. La question devrait alors être reformulée : en quoi ces deux processus de mesure ne sont-ils pas équivalents au sens physique et/ou mathématique du terme ? La mesure indirecte de h, obtenue en fixant conventionnellement la valeur de la constante N_a est-elle entachée d'une quantité non prise en compte ou l'origine de cet écart est-elle liée fondamentalement à une mésinterprétation de la mécanique quantique ?

[132] Status of the Planck and Avogadro constants in july 2017: ensemble view and latest determinations, BIPM Mass Department, Document interne

Une telle divergence de résultats s'est déjà rencontrée ; Par exemple, lors de la mesure du diamètre du proton par deux méthodologies de mesure différentes[133] : la valeur du rayon de du proton obtenue par spectroscopie de l'hydrogène muonique diffère de 7 sigma de la valeur donnée par le CODATA 2010. L'origine de ce désaccord sur la mesure du diamètre du proton n'est pas totalement comprise à l'heure actuelle et reste donc une question ouverte.

La technologie nécessaire à la réalisation des sphères de silicium requière l'existence d'infrastructures industrielles qui ne sont accessibles qu'à un petit nombre d'états, quand celle de la balance du Watt reste a priori accessible à la majorité des pays signataires de la convention du système international des unités de mesures.

La masse en fonction du rapport h/m

De Broglie a avancé l'idée, dans son travail de doctorat, qu'à tout objet de masse non nulle en mouvement était associée une onde, usuellement qualifiée d'onde pilote, de nature inconnue, qui permet d'expliquer des figures d'interférences obtenues en utilisant, par exemple, des jets de particules dans un dispositif d'interférences du type à fentes d'Young. La longueur d'onde λ associée à un objet, microscopique ou macroscopique, de masse m se déplaçant à une vitesse v est modélisé par la relation :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Il a montré également que l'énergie associée à la masse m pouvait être reliée à son temps propre τ [134] de façon à obtenir la phase φ d'une oscillation interne de l'objet massique en mouvement relatif :

$$\varphi = mc^2 \frac{\tau}{h}$$

Le produit $mc^2\tau$ est une action qui, comparée au quantum d'action élémentaire h, donne la mesure d'une phase pouvant être mise en évidence par des dispositifs interférométriques construits sur ces principes de de Broglie. Le rapport $\frac{mc^2}{h}$ est donc homogène à une fréquence et est appelé fréquence de Broglie-Compton ; l'onde avec cette fréquence est celle de cette onde pilote permettant l'apparition de phénomènes d'interférences prédits par de Broglie et vérifiés depuis dans de nombreuses configurations allant jusqu'à des macromolécules comme celles de fullerène ou même de chlorure de fullerène[135]. La vitesse de la lumière et le temps propre étant, selon la relativité des grandeurs mesurables, il est possible de déduire de cette mesure de phase la valeur du rapport $\frac{h}{m}$ pour chaque type d'atome donné. La première mesure de ce rapport fut faite par C. Bordé en utilisant des molécules de méthane[136]. La masse d'un atome ou d'une molécule peut être mesurée par d'autres moyens indépendants des technologies d'interférométrie, par exemple en utilisant la constante d'Avogadro, permettant ainsi, à partir de la valeur mesurée du rapport $\frac{h}{m}$ d'obtenir une valeur précise de la constante de Planck h.

Cette technologie a ensuite été réutilisée avec des atomes refroidis[137], limitant ainsi leur énergie cinétique et donc l'erreur de mesure faite sur la masse, qui ont permis l'obtention de précision de l'ordre de 10^{-8}. Si m_{at} représente la masse d'un atome de type donné quelconque, nous pouvons relier la masse de l'unité du kilogramme à la fréquence de de Broglie-Compton

[133] Antognini Aldo and al, 25 january 2013, Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen, p 417-420

[134] de Broglie Louis, sept 1923, Ondes et quanta, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 2, 507.

[135] Arndt Markus, Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw et Anton Zeilinger, « Wave-particle duality of C60 », Nature, vol. 401, 1999, p. 680-682

[136] Bordé Ch. J. and J. L. Hall, 1974, Direct resolution of the recoil doublets using saturated absorption techniques, Bull. Amer. Phys. Soc., 19, 1196.

[137] Bouchendira R. et al., 2011, New Determination of the Fine Structure Constant and Test of the Quantum Electrodynamics, PRL 106, 080801.

en multipliant les deux termes de la relation entre cette masse atomique et la fréquence de de Broglie-Compton :

$$f_{dBC} = \frac{M_{kg}c^2}{h} = 1000\ N_a \left(\frac{m_{at}c^2}{h}\right)$$

Où m_{at} correspond à la masse atomique de la substance constituant l'unité du kilogramme. Avec cette définition, comme le fait remarquer C. Bordé[138] :

« Le kilogramme est l'unité de masse, il est la masse d'un corps dont la fréquence de de Broglie-Compton est égale à $\frac{(299792458)^2}{6{,}6260693\ 10^{-34}}$ *Hertz exactement.* »

La fréquence de l'onde pilote associée à une masse d'un kilogramme est bien au-delà des performances technologiques actuelles. Celles qui le sont correspondent à des atomes ou des molécules ne dépassant pas un millier de masse atomique. Ces masses mesurables restent donc dans le domaine microscopique. Définir une masse macroscopique comme le kilogramme à partir de masses de référence microscopiques pose l'intéressante question du passage entre le monde de l'infiniment petit à celui des objets de notre quotidien, en particulier celle, toujours ouverte, de la réduction de la fonction d'onde par l'acte de mesure.

Ces considérations contraignent, pour l'instant, l'élaboration d'une définition du kilogramme à se référer aux seules technologies accessibles et disponibles aujourd'hui : la détermination précise du nombre d'Avogadro, la mesure de la masse du kilogramme en comptant le nombre d'atomes d'une masse individuelle m mesurée par diffraction X et l'utilisation de la balance du Watt pour mesurer dans un premier temps la constante de Planck h, puis ensuite la masse d'un objet supposé être d'un kilogramme exactement comme une fonction de cette constante h. Les écarts constatés pour la valeur de la constante de Planck h et la définition de l'unité de masse par la mesure du rapport h/m restent une préoccupation qui pousse les métrologues à poursuivre leur investigation pour une future utilisation de cette troisième possibilité de la définition du kilogramme unité qui serait alors fondé sur les technologies optiques des interférences lumineuses. Une telle direction permettrait en outre d'accroître le domaine des masses mesurables, contrairement à la balance du watt, par exemple, qui ne permet que des mesures dans un intervalle réduit de quelques centaines de grammes, limite liée à la réalisation d'un champ magnétique à la fois intense et uniforme.

La mesure directe de la constante h, la balance du watt

La méthode de mesure directe de la constante de Planck h utilise la balance du Watt, système classique auquel on ajoute de façon séparée deux dispositifs de mesure de la tension et de l'intensité purement quantique. Un tel dispositif global peut être qualifié d'abstrait[139], car la partie quantique du dispositif est bien distincte du reste de la balance et ne coopère en rien avec elle, alors que les différentes parties constitutives de cette balance, la bobine de conducteur, l'aimant générateur du champ magnétique et la partie mécanique de la balance forment un tout cohérent et interactif. Si l'on ne considère que la balance proprement dite, en laissant de côté le système de mesure du signal résultant, de sa tension reposant sur l'effet Josephson et du courant correspondant, reposant lui sur l'effet Hall quantique ou effet Von Klitzing, alors ce dispositif, cette machine complexe est vraiment concrète car elle lie étroitement et de façon indissociable les deux phases de fonctionnement : la phase statique et la phase dynamique, les dimensions de la bobine, la source de champ magnétique ayant été choisi de manière à optimiser chacune des deux phases de la mesure.

[138] Bordé C., 2004, Métrologie fondamentale : unités de base et constantes fondamentales, C. R. Physique 5 813–820

[139] Simondon G., 1958, Du mode d'existence des objets techniques, édition de 2012, Aubier philosophie, pp. 21-49

Chaque choix technologique de ces différentes parties à une implication sur le résultat de la mesure dans ces deux phases, notamment la précision obtenue. L'objet ainsi constitué, la balance du Watt, est alors si optimisé qu'en quelque sorte il guide l'utilisateur vers une voie unique de mesure, celle à laquelle conduit ce type de dispositif. La haute qualité et la complexité extrême de cette machine sont telles que l'on peut se demander si sa nature n'est pas suffisante pour justifier son choix comme instrument privilégié de la détermination de la constante h sur laquelle repose la définition du kilogramme. Mais pour comprendre comment en est-on arrivé à cette juxtaposition d'un dispositif classique, une balance mécanique alliée à un phénomène électromagnétique, avec deux dispositifs purement quantiques de mesure de la tension et du courant, il nous faut considérer l'histoire de l'élaboration de ce dispositif complexe de métrologie.

De nombreux articles ont été consacrés à l'histoire des dispositifs de mesure qui ont permis à Kibble[140] de mettre au point la balance du Watt, mais seulement un petit nombre[141] ont donné un panorama complet sur les idées d'origines ayant conduit à ce dispositif. Historiquement, les premières mesures ont cherché à déterminer directement ou indirectement la valeur de la constante h postulée par Planck[142]. La mesure directe de la valeur absolue de cette constante étant au début du 20ème siècle inenvisageable, les recherches se sont reportées vers la mesure du rapport h/e plus abordable, et plus précis, vis-à-vis des technologies disponibles à cette époque.

Historiquement, toutes les déterminations des masses ont nécessité la mesure d'une tension en accord avec le système d'unités utilisé au moment de la mesure. Une méthode, développé par Sir William Snow Harris[143] en 1834 et perfectionné par Sir William Thompson[144] en 1868, Lord Kelvin, utilise pour cette mesure un électromètre.

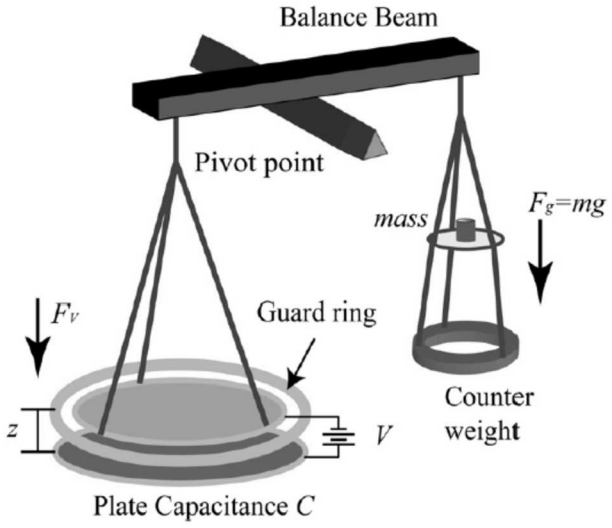

Figure 3 : Schéma de la balance du voltage absolu (extrait de l'article de R. Steiner[145])

[140] Kibble B. P., 1970, « A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method », Atomic Masses and Fundamental Constants 5, edited by J. II. Sanders and A. II. Wapstra, New-York, Plenum Press, 545-551

[141] Steiner R., 2013, History and progress on accurate measurements of the Planck constant, Rep. Prog. Phys. 76 016101

[142] Planck M., 1900, Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung Verh. Dtsch. Phys. Ges. 2 202-4, planck M 1967 On an improvement of Wien's equation for the spectrum, The Old Quantum Theory ed D ter Haar (New York: Pergamon) p. 79

[143] Harris W. Snow, 1834, An X-ray interferometer, Phil. Trans. R. Soc. Lond. Part II 213-45, P212

[144] Thomson W., 1868, Report on electrometers and electrostatic measurements Report of the 37th Meeting of the British Association for the Advancement of Science pp 489-512

[145] Steiner R., 2013, History and progress on accurate measurements of the Planck constant, Rep. Prog. Phys. 76 016101 (46pp)

Dans ce dispositif de mesure, l'équilibre se fait entre la force gravitationnelle que subit la masse m et la force électrostatique s'exerçant entre les deux plateaux du condensateur C. Une version moderne[146] complète ce dispositif par la mesure du condensateur C en utilisant comme étalon un condensateur de Thomson-Lampard [147] dont la capacité est mathématiquement calculable. La force gravitationnelle agissant sur la masse m est équilibrée par la force électrique due à la variation différentielle de la capacité formée par deux surfaces plates en regard séparées par une distance z et soumises à une tension V :

$$V = \left(2mg\frac{dz}{dC}\right)^{1/2}$$

Le LCIE a construit un exemplaire de cette balance en 1983. Cette méthodologie de mesure et ses variantes présentent plusieurs défauts, inhérents aux dispositifs, qui limitent la précision atteignable : avec de très hautes tensions de plusieurs kilovolts, il est nécessaire d'utiliser des électrodes de grandes tailles qui sont lourdes et délicates à stabiliser dans un mouvement vertical ; par ailleurs une telle balance ne peut équilibrer que des masses de faible valeur de l'ordre du gramme. La sensibilité est donc très faible compte tenu de l'inertie des plateaux du condensateur très lourds et des différentes forces de résistances dues aux frottements. Enfin les hautes tensions utilisées posent également, outre des questions de sécurité, des problèmes d'interactions avec les équipements de mesure associés.

Cette observation du LCIE montre à quel point l'instrumentation d'une époque, la direction prise en métrologie, est dépendante de l'état des technologies existantes et donc d'une collaboration implicite des industriels avec le monde la recherche fondamentale.

Pour éviter ces inconvénients très gênants, sans modification du fonctionnement du dispositif, un perfectionnement [148] datant de 1965 propose l'utilisation d'un électromètre liquide.

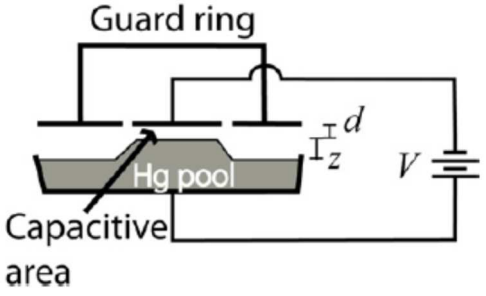

Figure 4 : Schéma de l'électromètre modifié

Dans cette variante, l'application d'une tension aux deux parties de la cuve à électrolyte liquide, du mercure, va modifier la hauteur du mercure en le rapprochant de la surface de l'électrode plate et solide située au-dessus. De cette façon la mesure de la force capacitive se résume à la mesure de la variation de la hauteur z du mercure donc la variation de la distance d entre l'électrode supérieure et la surface du mercure. Cette distance peut être mesurée avec précision en utilisant les nouvelles technologies d'interférométrie. Bien sûr il faut également tenir compte de la courbure du ménisque formé par la surface du mercure, courbure d'autant plus négligeable que la surface de l'électrode en regard est importante. Ce choix d'électromètre a été fait par le CSIRO en Australie. La tension V, dans cette variante, est donnée par la relation mathématique :

[146] Ohlon R., 1967, An electrostatic method for the absolute measurement of voltage, Metrologia 3 33-7

[147] Thompson A. M. and Lampard D. G., 1956, A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance, Nature 177 ,888

[148] Yamazaki T., Shida K. and Kanno M., 1972, Absolute measurement of voltage by an electrostatic energy-changing method IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-21, 372-5

$$V = \left(2\frac{\rho g}{\varepsilon}\right)^{1/2} dz^{1/2}$$

Où ρ est la densité du mercure et ε la permittivité du volume de gaz situé entre l'électrode et la surface du mercure.

Un second dispositif de mesure, destiné à la mesure du courant et à la définition de son unité, l'Ampère, a été modifié pour permettre la réalisation d'un autre dispositif de mesure : la balance de courant ou l'ampère absolu. L'ampère et le Volt sont deux unités dérivées du SI, le Volt pouvant être construite en fonction de l'ampère et de l'unité de résistance, elle aussi une unité dérivée, l'ohm. Nous avons montré que l'Ampère devait, selon nous, cesser d'être considéré comme une unité dérivée bien sa dimension puisse s'exprimer comme combinaison des trois dimensions primitives. Émerge ainsi la question suivante : pourquoi les lois de la physique nous disent-elles que la charge électrique élémentaire ne peut être reliée conceptuellement aux trois grandeurs primaires alors que sa dimension peut être dérivée des trois dimensions primitives associées aux trois unités primaires ? Nous touchons là, il nous semble, une des questions fondamentales de la physique moderne. Nous reviendrons sur celle-ci au chapitre suivant.

Admise depuis 1893 en tant qu'unité, sa définition jusqu'à la CGPM de 2018 n'a été énoncée qu'en 1948 : « *l'ampère est le courant parcourant deux fils de section négligeable, de longueur infinie et situé à une distance d'un mètre l'un de l'autre, qui exerce une force entre ces conducteurs égale à 2 10^{-7} N/m* ». On voit immédiatement l'irréalisme de cette définition. Comment en effet fabriqué un dispositif utilisant un fil conducteur de longueur infini et qui par surcroît devrait être de diamètre nul ! C'est bien sûr impossible et cette définition montrait le profond embarras des scientifiques de cette époque qui n'ont pas réussi à trouver une alternative à cette définition. Il est intéressant de constater que plutôt que de surseoir à l'élaboration d'une définition irréaliste, les scientifiques et métrologues préféraient accepter l'inacceptable afin de permettre à la technologie maîtrisée par les industriels, et plus généralement le monde de l'économie de progresser. Ce n'est qu'en 2018, les technologies de détection et de comptage d'un flux de particules chargées ayant beaucoup progressé que l'ensemble des acteurs du Si jugèrent possible et souhaitable de changer la définition de l'Ampère :

« L'ampère, A, est l'unité du courant électrique ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement 1,602 176 634 × 10^{-19} quand elle est exprimée en A s, ce qui correspond à des Coulombs. »

Ce fut un processus similaire qui conduisit à la nouvelle définition de l'unité de masse, le kilogramme en tant que fonction des deux constantes fondamentales : la charge de l'électron et la constante de Planck. En 2004, déjà, l'académie des sciences dans l'introduction de son rapport sur la métrologie du futur écrivait :

« Présente partout, la métrologie doit aussi être un effort ininterrompu, pour s'adapter aux services qu'on attend d'elle. Tout en étant toujours fondamentalement liée à l'industrie et au commerce, c'est-à-dire à l'économie d'un pays, la métrologie doit aussi contribuer, et de plus en plus, à satisfaire les besoins de la population, notamment dans les domaines de l'alimentation, de la sécurité, de la santé et de l'environnement. En cela elle constitue un service fondamental à la société en général. »

Puis un peu plus loin dans ce même rapport (p 13) :

« Ainsi, au cours des années 1960-90, les besoins en exactitude des industriels se sont accrus d'un facteur 100 tous les 10 à 15 ans dans le domaine des mesures dimensionnelles, du temps, et d'un facteur 10 dans le domaine des mesures électriques ou de l'étalonnage des masses. Même dans les domaines aussi classiques que la construction automobile, une étude du NIST aux États-Unis a montré que les tolérances dimensionnelles des pièces mécaniques sont divisées par deux tous les dix ans. »

Dans sa conception originale, au début du 20ème siècle, cette balance du Watt permet d'équilibrer une force gravitationnelle représentée par une masse accrochée à l'extrémité du

fléau d'une balance, à l'autre extrémité étant suspendu une bobine de fils conducteur horizontale et placée entre deux bobines d'induction plus grande et également horizontale comme représenté sur la figure ci-après.

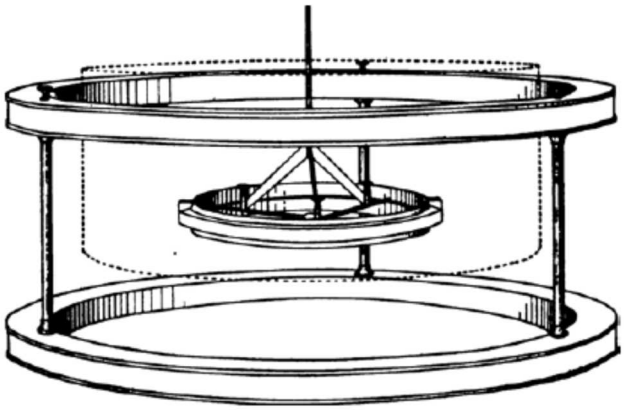

Figure 5 : Principe de la balance de l'Ampère

De nombreuses améliorations ont été apportées à ce principe de base durant cette période[149], dont une des principales sources d'erreur et donc de limitation de la précision de mesure était l'inhomogénéité du champ magnétique entre les deux bobines fixes. Dans ce dispositif, la relation entre masse m, longueur, temps et courants est donné par la relation :

$$mg = I_1 I_2 \frac{\Delta L_{12}}{\Delta z}$$

Où I_1 et I_2 représentent les courants circulant respectivement dans les bobines fixes et dans la bobine mobile centrale, et $\frac{\Delta L_{12}}{\Delta z}$ le gradient d'induction mutuelle calculé mathématiquement en utilisant les dimensions théoriques des bobines.

En 1970, il est apparu que des écarts apparaissaient dans les valeurs obtenues pour l'ampère déterminés à partir de ces dispositifs de mesure. Une des causes évidentes de ce problème était la grande difficulté, comme nous venons de le dire, de déterminer théoriquement la valeur du gradient d'induction mutuelle par la seule connaissance des dimensions des bobines. Il y avait trop de paramètres à prendre en compte, trop de sources possibles d'erreurs, qui pouvaient avoir une influence non négligeable sur la valeur de cette fonction. Kibble[150] en 1976 proposa d'utiliser un même dispositif dans deux modes différents de mesure : un mode statique et un mode dynamique. L'avantage principal d'une telle procédure de mesure était de permettre l'obtention de deux relations mathématiques contenant toutes deux le même terme complexe, représentant ce coefficient de gradient d'induction mutuelle ; ainsi en soustrayant ces deux relations il devenait possible d'éliminer ce terme complexe, principale source d'erreurs. La question qui restait néanmoins, mais qui ne semble pas avoir été considérée comme importante à cette époque, était l'ordre de ces deux mesures statique et dynamique : l'ordre d'exécution introduit-il une source d'erreur supplémentaire ? autrement dit, l'inversion des deux phases de la procédure de mesure peut-elle avoir une influence sur le dispositif de mesure et donc sur le résultat et son degré de précision ? Cette question reste aujourd'hui ouverte.

De ces évolutions va naître la forme actuelle de la balance du Watt. Le schéma de principe de cette balance conduit à équilibrer la force de gravitation générée par une masse sur l'un des plateaux de la balance par une force électromagnétique, force de Laplace, subit par une bobine conductrice placée au centre d'un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ horizontal. Les figures ci-

[149] Ayrton F. E., Mather T. and Smith F. E., 1908, a new current weigher and a determination of the electromotive force of the normal Weston cadmium cell, Phil. Trans. R. Soc.Lond. 207 463-544

[150] Kibble B., 1976, A suggestion for a different way of realizing the ampere Atomic Masses and Fundamental Constants, vol. 5, ed J. H. Sanders and A. H. Wapstra (New York: Plenum) pp. 549-51

après représentent le schéma de principe de ce dispositif, et la photo, un exemple de réalisation pratique de cette balance du Watt construite par le BIPM.

Cette technique de double mesure et d'élimination de la source d'erreur, ou de bruits, est souvent utilisée par les ingénieurs et les métrologues. Elle repose sur l'acceptation de nos limites dans certains domaines scientifiques, et sur le constat qu'il n'est pas toujours nécessaire de tout comprendre pour réaliser des dispositifs performants. Cette attitude, que l'on pourrait qualifier de réaliste, montre, s'il en est encore besoin, la domination de la technologie et de sa finalité économique face au désir légitime de compréhension des chercheurs en sciences fondamentales.

Récemment, dans les télescopes terrestres on a utilisé des « optiques adaptatives » qui permettent de générer des déformations d'un miroir en fonction d'une mesure du bruit lumineux et ainsi par soustraction de pouvoir augmenter considérablement la netteté des images obtenues. Ce type de dispositif relève de la même stratégie. L'augmentation de la précision de mesure par cette technique suppose comme hypothèse préalable que le signal que l'on cherche à soustraire est bien le même dans les deux mesures faites généralement avec le même dispositif expérimental mais dans des méthodologies différentes, dans le cas la balance du Watt, mesure statique contre mesure dynamique.

La validité de mode opératoire par soustraction n'est pas théoriquement prouvée et n'est que le résultat d'un raisonnement déductif par analogie, que métrologues et scientifiques estiment logique et fondé. Mais dans cet exemple de mesures statique puis dynamique, il existe des différences expérimentales : par exemple, dans la phase de mesure dynamique certaines parties du dispositif sont mobiles et les résistances ou frottements devraient être mieux pris en compte dans le calcul de la précision finale obtenue par soustraction des mesures dans ces deux phases.

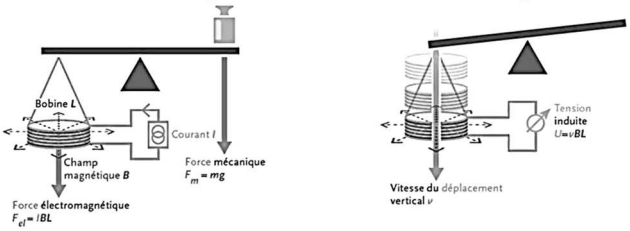

Figure 6 : Schéma de principe de la balance du Watt actuelle définie par Kibble

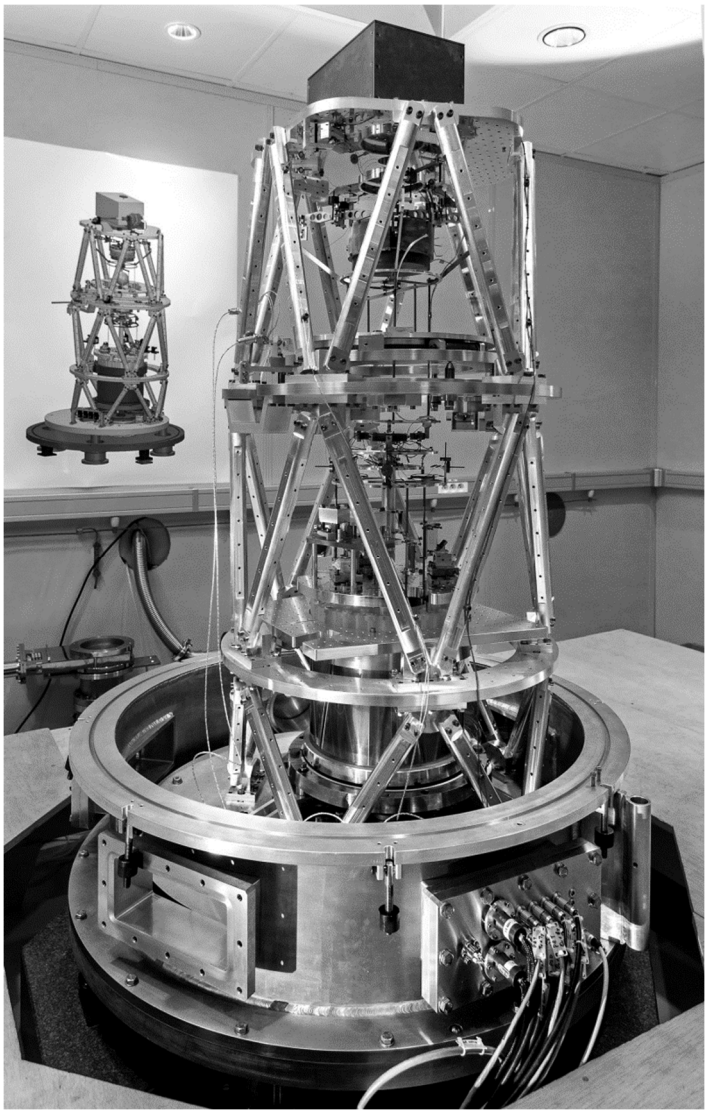

Figure 7 : La balance du Watt du BIPM en 2017 pendant une phase de maintenance

Les deux phases statiques et dynamiques vont permettre d'écrire deux relations mathématiques dont les coefficients vont être déterminés par la mesure d'une tension et d'un courant pour chacune de ces deux phases. La phase statique va conduire à une relation liant le champ magnétique B, la longueur du conducteur L, l'intensité du courant parcourant celle-ci à la force mécanique de gravitation exprimée selon la loi de Newton :

$$mg = BIL$$

La seconde phase va relier les éléments internes du dispositif de la balance du Watt, le générateur du champ magnétique B, la bobine de fil conducteur de longueur totale L et la vitesse v du déplacement de cette bobine avec la tension U induite mesurée aux bornes de cette bobine :

$$U = vBL$$

Ces deux équations étant relatives au même dispositif global, les physiciens estiment qu'elles vont pouvoir être reliées pour former un système homogène d'équations qui va permettre d'éliminer le produit BL, principale source de limitation de la précision de mesure de h donc de la masse étalon. En effet, pour équilibrer la force de pesanteur générée par une masse d'un kilogramme, le courant I, la longueur de fil conducteur L et le champ magnétique B doivent atteindre des valeurs respectives élevées. La bobine possédant un diamètre important et de nombreuses spires, la précision obtenue pour sa réalisation pratique est fortement limitée par sa reproductibilité. Pour générer un champ magnétique élevé, deux technologies sont disponibles actuellement :

Un aimant permanent utilisant des céramiques magnétiques mais qui ne peuvent garantir une bonne homogénéité du champ, sur un grand volume comme celui nécessaire par le dispositif de la balance, qu'avec un degré de précision assez faible,

Un aimant supraconducteur pour lequel, outre les difficultés et limitations voisines de celles d'un aimant permanent, les métrologues doivent ajouter les problèmes technologiques liées au refroidissement de la bobine et des contraintes thermiques liées aux bons fonctionnements des autres parties de la balance durant les deux phases statique et dynamique.

Une telle réalisation de la balance est donc limitée en précision à la fois par les contraintes mécaniques mais également et surtout par la précision des mesures des tensions U et des courants I. il fallait ainsi un autre dispositif permettant d'augmenter fortement la précision sur la mesure des tensions et des courants, de façon reproductible, pour accepter l'instrument « balance du Watt » comme celui de référence pour la nouvelle définition du kilogramme. Faute d'une grande précision dans la mesure des deux grandeurs électriques ce dispositif ne pouvait prétendre à être le dispositif de référence dans la définition du kilogramme.

À ce stade de la description de la balance du Watt se pose la question de l'égalité de deux forces de natures différentes : une force électrique et une force mécanique. En effet la force mécanique est l'interaction gravitationnelle et n'est pas une force au sens mécanique du terme mais une recherche par le dispositif de l'énergie potentielle minimum de gravitation en se référant à la courbure locale de l'espace-temps. Le plateau supportant la masse va suivre la déformation des géodésiques dont la cause est la présence de la masse M sur le plateau de la balance, mais également la présence plus ou moins rapprochée de toutes les masses, depuis celle des éléments de la balance jusqu'au système solaire. La force électrique, elle, est du type électromagnétique, est une force de Lorentz (ou de Laplace). Elle résulte de l'interaction du champ magnétique sur un fil conducteur parcouru par un flux d'électrons de charge e^-. Cette force est la somme de toutes les forces unitaires agissant sur chaque électron en mouvement. La nature de cette force, parfaitement décrite par les équations de Maxwell, reste largement incomprise : quelle est la nature de l'interaction entre une charge unitaire en mouvement et un champ magnétique ? Au niveau microscopique cette interaction reste une question ouverte. S'agit-il d'une force au sens Newtonien du terme ou une variation d'énergie comme l'interaction gravitationnelle ? La question est toujours ouverte. La mise en relation de ces deux termes pose ainsi un problème de nature conceptuelle non résolu.

Ces interrogations vont augmenter avec le souci légitime d'accroissement de la précision de la mesure obtenu avec l'utilisation de deux phénomènes purement quantiques pour mesurer, d'une par le courant circulant dans la bobine, et d'autre part la tension aux bornes de celles-ci comme nous allons le voir.

En 1961, les métrologues eurent l'espoir de pouvoir utiliser une nouvelle technologie, indépendante des mesures par diffraction des rayons X. Cet espoir reposait sur la découverte que le flux magnétique dans les supraconducteurs de type I ou II était quantifié[151][152] avec un quanta minimum égal à $\frac{h}{2e}$. Les métrologues ont pensé que cette découverte pouvait conduire à des processus de mesure qui permettraient une meilleure précision de la constante h. Mais cette méthode de mesure utilisant la quantification des flux va être assez rapidement abandonnée au profit d'une autre utilisant deux nouveaux phénomènes découverts quelques années plus tard, l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. On constate ici, encore une fois, combien l'échelle de temps de l'évolution des doctrines de mesures peut sembler longue et les évolutions lentes. Mais celles-ci sont le résultat d'une interaction entre les découvertes de la

[151] Deaver B. S. and W. M. Fairbank, 1961, experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders, Phys. Rev. Lett. 7, 43-6

[152] Doll R. and M. Näbauer, 1961, proof of magnetic flux quantization in a superconducting ring, Phys. Rev. Lett. 7, 51-2

physique fondamentale, et les évolutions technologiques qui, bien souvent, évoluent par saut brusque et non de façon progressive et continue. Elles nécessitent aussi l'obtention d'un consensus qui doit être trouvé entre les intérêts divergents des physiciens théoriciens, des métrologues et des acteurs du monde industriel et économique qui financent l'étude et le développement de ces nouveaux moyens de mesure. Lorsqu'un changement est proposé à la suite de la découverte d'un nouveau moyen de mesure, les instigateurs de la modification de procédure et de technologie se heurte à de nombreuses résistances ; la société a horreur des changements et l'inertie précède toujours un changement majeur de paradigme. Ces changements, ces évolutions sont aussi l'occasion de réanalyser les procédures de vérifications existantes et de corriger certaines dérives constatées, souvent dues à l'installation de routines, d'automatismes, dans les comportements des différents acteurs.

Il a été observé, par exemple pendant cette même période, un écart entre les mesures réalisées à partir des cellules voltaïques de référence utilisées par de nombreuses nations avec celles du volt de référence, celles du SI, écart résultant d'un non-respect des procédures strictes devant être appliqué pour la conservation des références secondaires, celles qui sont distribuées dans les pays adhérents au SI. Il en a résulté la constatation qu'une dérive systématique de 10µV existait entre la définition du SI et les cellules chimiques voltaïques de références présentes dans ces pays [153][154]. Une action était donc nécessaire sur deux mesures des grandeurs électriques : le volt et l'Ampère. La solution fut obtenue par une technologie dérivée de phénomènes quantiques nouveaux observés dans les supraconducteurs : l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. Encore une fois c'était l'état des connaissances, des phénomènes observés et compris à un instant donné, qui va contraindre la direction de l'évolution de la définition d'une unité de mesures. Si l'un de ces effets, n'avaient pas été observés et compris au moins de façon empirique, soit la balance du watt aurait été jugée insuffisante pour mesurer la constante de Planck h, soit les métrologues et les ingénieurs auraient été obligés de rechercher une autre solution technologique pour la mesure de la constante h. L'absence de la découverte et de la compréhension de l'un de ces deux effets quantiques aurait fait reculer, d'une période indéterminée, la référence de toutes les unités aux constantes fondamentales.

Une jonction Josephson est une liaison entre deux supraconducteurs où la cohérence de la longueur d'onde quantique dans le supraconducteur est affaiblie par une couche purement résistive séparant les deux supraconducteurs. Lorsqu'une telle configuration est éclairée par une onde électromagnétique de fréquence f_0, dans le domaine des ondes millimétriques ou au-delà, la tension aux bornes de la jonction est décrite par la relation :

$$V = nf_0\left(\frac{h}{2e}\right)$$

L'effet Josephson représente une des plus évidentes manifestations de propriétés quantiques au niveau macroscopique. Prédit par Brian Josephson en 1962, cet effet décrit à l'origine le comportement de deux supraconducteurs séparés par une barrière isolante. Josephson a montré qu'un courant I_s constitué de paires de Cooper (deux électrons appariés) peut traverser la barrière isolante même à tension nulle ; ce courant est fonction de la différence de phase $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ entre les fonctions d'ondes des deux supraconducteurs :

$$I_s = I_c\, sin\varphi$$

[153] Cohen E. R. and J. M. M. Dumond, 1965, Our know ledge of the physical contants of physics and chemistry in 1965, Rev. Mod. Phys., 4 538-94

[154] Séances PV 1968 Com. Intl. Poids Mes. 57th Session 36 17

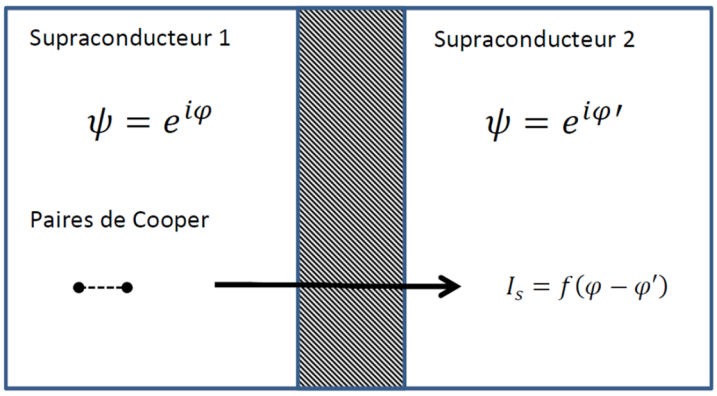

Figure 8 : Principe fonctionnel d'une jonction Josephson

I_c est le courant critique de la jonction qui dépend des facteurs géométriques de la barrière, des propriétés des matériaux, et de la température de fonctionnement. La seconde relation démontrée par Josephson lie la différence de phase φ aux propriétés électrodynamiques de la jonction :

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} U$$

Où U est la tension aux bornes de la jonction Josephson. Cette relation ne prend en compte aucune approximation, et considère seulement des grandeurs physiques fondamentales. Elle reste toujours valable. On peut concevoir l'effet Josephson dans deux régimes différents selon que φ varie ou est constante avec le temps. Dans le premier cas on parle d'effet Josephson continu. On trouve alors que la tension U aux bornes de la jonction est nulle. Le courant I_s traversant la jonction ne dépend pas du temps. Lorsque la tension U appliquée aux bornes de la jonction est non nulle, on observe alors que la différence de phase φ varie selon la relation :

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{2eU}{\hbar} t$$

Ce qui permet d'écrire la relation :

$$I_s = I_c \left(\varphi_0 + \frac{2eU}{\hbar} t\right)$$

Montrant que le courant I_s est une fonction périodique du temps, qui oscille avec une fréquence $\omega_\upsilon = \frac{2eU}{\hbar}$. En ramenant la mesure d'une tension à une fréquence, on accède à une très grande précision et reproductivité de la mesure.

Il faudra attendre plus d'une dizaine d'années d'études et de validations avant que l'utilisation de cet effet puisse être reconnu comme suffisamment compris et maîtrisé et que son usage puisse être envisagé en métrologie comme référence de tension en place des cellules chimiques utilisées jusque-là. L'accord des nations sur l'utilisation de l'effet Josephson ne se fera qu'en 1972 mais cet accord ne le validera pas comme faisant partie des définitions utilisées dans le SI ; l'effet n'est reconnu qu'en tant que moyen technologique de mesure.

La caractéristique d'une jonction Josephson peut se résumer de la façon suivante : une jonction génère une tension en escalier d'amplitude de 5 à 10 mV avec une largeur correspondant à une variation de courant de quelques micro-ampères.

Le second phénomène qui va achever la révolution dans la métrologie dans les procédures de mesure des quantités électriques, l'effet Hall quantique, va être découvert en 1980 par Von Klitzing[155]. Il met en évidence la présence de plateau de courant dans l'effet Hall lorsque cette cellule à effet Hall est soumise à un fort champ magnétique.

L'effet hall quantique (EHQ) est directement dérivé de l'effet Hall classique. Dans l'effet Hall classique, un élément conducteur, par exemple de forme parallélépipédique parcouru par

[155] Klitzing von K., G. Dorda and M. Pepper, 1980, New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized Hall resistance, Phys. Rev. Lett., 45 494-7

un courant I dans la direction Ox, est soumis à un champ magnétique constant orienté selon la direction Oz. On observe alors l'apparition d'une tension selon la direction Oy due à la force de Lorentz agissant sur les électrons de conduction se déplaçant dans le conducteur. L'effet Hall quantique entier (EHQE) a été découvert à Grenoble en 1980 par K. von Klitzing. En étudiant des éléments MOSFET de silicium à basse température et soumis à la perturbation créée par un fort champ magnétique, il observa des plateaux dans la conductivité de Hall, en fonction de la concentration d'électrons, accompagnés d'une dissipation nulle. Cet effet repose sur une configuration expérimentale équivalente à l'effet Hall classique, mais à très basse température (typiquement 1,5 K), et sous fort champ magnétique. La résistance de Hall[156] définie par la quantité $R_H = \frac{V_H}{I}$ prend les valeurs quantifiées$R_H = \frac{R_K}{n}$, où n est un entier et $R_K = \frac{h}{e^2}$.. La résistance mesurée peut être modélisée par l'expression :

$$R = \frac{1}{n}\frac{h}{e^2}$$

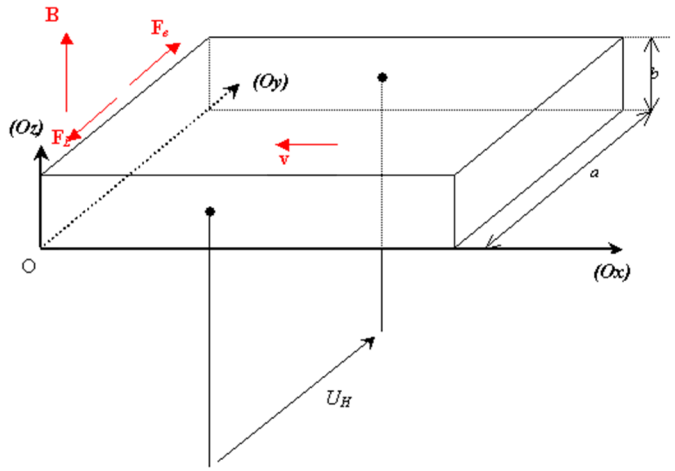

Figure 9 : Schéma de principe d'une cellule à effet Hall quantique

Depuis 1990[157], le Comité consultatif des Poids et Mesures (CIPM) recommande aux Laboratoires Nationaux de Métrologie (LNM) l'utilisation de l'EHQ (l'effet Hall quantique) pour la conservation de l'unité de résistance : l'Ohm.

Cette jonction peut constituer un étalon quantique de résistance de valeur $\frac{R_K}{n}$ (n=2 ou 4) dont la reproductibilité relative est assurée à quelques 10^{-10}. En revanche, une incertitude relative égale à 10^{-7} semble assignée à la détermination de R_K dans le Système International d'unités (SI). Afin de faciliter les comparaisons internationales et la conservation de l'Ohm, une valeur conventionnellement vraie $R_{K\text{-}90}$ de R_K a été décidée en 1990 par le CIPM. $R_{K\text{-}90}$ est exactement égal à 25812,807 Ω. Le pont de comparaison de résistances du LNE basé sur un Comparateur Cryogénique de Courants Continus (4C) permet d'étalonner des étalons de valeurs nominales 1 Ω , 100Ω , 10 kΩ avec une incertitude relative de quelques 10^{-9} en termes de $R_{K\text{-}90}$.

Le modèle théorique explicatif de l'EHQ est considéré à ce jour comme incomplet et de ce fait reste partiellement controversé par certains physiciens[158] qui considèrent que se servir de cet effet pour la mesure de la constante de Planck h sur laquelle repose la définition du kilogramme n'est pas justifié :

« Pour le moment, il n'existe à ce jour aucune théorie satisfaisante de ce phénomène »

[156] Cet effet est lié d'une part à la quantification en niveaux d'énergie de Landau de la densité d'états et d'autre part à l'existence d'un gap de conductivité lié à la formation par le désordre d'états localisés ; Cette localisation est responsable de l'annulation de la résistance longitudinale $R_{xx} = \frac{V_{xx}}{I}$ au milieu du plateau de quantification observé.

[157] CIPM, 1990, Procès-verbaux de la 7ge session Report of the 79th Meeting TOME 58

[158] Weinheim VCH, 1994, Introduction of the Theory of the Integer Quantum Hall Effect, New-York

Les modèles théoriques associés à ces deux effets quantiques, permettent d'exprimer de façon suffisamment reproductible sur le plan technologique les constantes de Josephson Kj et de Von Klitzing R_k en fonction de la constante de Planck *h* et la charge de l'électron *e* selon :

$K_j = \frac{2e}{h}$ $R_k = \frac{h}{e^2}$

Ces constantes vont définir le quantum de précision des mesures du courant et de la tension pour des appareils de mesure fondés sur ces principes de fonctionnement.

Le courant I et la tension U, mesurées aux bornes de la bobine de fil conducteur de la balance du Watt avec ces dispositifs quantiques (effet Josephson et Hall quantique), vont conduire à une expression reliant la valeur de m aux deux constantes e, la charge électrique de l'électron et h :

$$h = \frac{4mgv}{A}$$

Où la constante A est une fonction des coefficients Josephson et Von Klitzing et déterminée empiriquement à partir des valeurs des constantes Josephson ($K_J = \frac{2e}{h}$) et Von Klitzing ($R_K = \frac{h}{e^2}$).

En opérant une première série de mesure à partir du kilogramme unité, dont la valeur est conventionnellement d'un kilogramme on détermine une valeur de la constante h ensuite fixée également de façon conventionnelle, puis une seconde série de mesures permet de vérifier la valeur de la masse d'un nouvel étalon matérialisée comme par exemple une sphère en silicium.

La technologie concurrente de la balance du Watt, la mesure du rapport h/m qui conduit à la réalisation d'une sphère en silicium d'un kilogramme, repose sur une approche physique différente. La balance du Watt opère une synthèse entre deux méthodologies, l'une reposant sur la mécanique classique, un dispositif de balance opérant un équilibre entre les effets de la gravitation et une force de Laplace dont l'intensité est fonction du courant parcourant le circuit électrique, l'autre sur deux phénomènes purement quantiques permettant la mesure de ce courant et de la tension associée. Le « comptage » d'atomes dans une sphère de silicium utilise, elle, une méthodologie s'appuyant sur les théories de la physique des solides et de l'électromagnétisme, deux théories classiques d'où les conceptions quantiques sont exclues.

La mécanique quantique repose sur plusieurs postulats intuitifs qui conduisent à une interprétation de la réalité qualifiée de standard si l'on se réfère à celle de l'école de Copenhague. Selon cette interprétation, le comportement de toute particule est décrit par un champ interagissant avec ceux du vide, l'énergie n'est pas une fonction continue mais discrète, le quantum d'action minimum étant représenté par la constante de Planck h. La mécanique classique, ou sa généralisation, la mécanique relativiste, repose, elle, sur deux hypothèses largement vérifiées empiriquement : une vitesse finie et constante de la vitesse de la lumière et une structure déformable de l'univers reposant sur le concept d'espace-temps selon lequel l'espace est quadridimensionnel, le temps constituant la quatrième dimension. La question qui émerge de ce constat porte sur la compatibilité des résultats de mesure fait à partir de ces deux dispositifs : les résultats de mesures obtenues à partir d'une méthodologie déterministe peuvent-ils être valablement comparés avec ceux résultant d'une mesure essentiellement quantique ? Nous ouvrons cette question sur laquelle nous reviendrons au chapitre 4.

Pourquoi une nouvelle définition du kilogramme reposant sur la constante de Planck h ?

L'objectif final de la réforme du SI était d'expliciter et de faire accepter un ensemble de sept définitions, une pour chaque unité du SI, chacune d'elle reposant sur une constante fondamentale, une pour chaque unité, même si en pratique une même constante pouvait présenter un lien avec plusieurs unités : c'est notamment le cas pour la quantité de charge élémentaire, celle de l'électron, e, que l'on retrouve à la fois dans la définition de l'ampère, cette unité étant officiellement liée à cette constante e, et celle du kilogramme qui bien que lié

à la constante de Planck h utilise également la constante e dans la procédure de mesure de la valeur numérique de h.

Depuis 2019, la nouvelle définition du kilogramme identifie la masse comme une fonction des constantes h et c la vitesse de la lumière dans le vide, la constante e ayant été également définie conventionnellement comme une valeur exacte :

« Le kilogramme, kg, est l'unité de masse ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement 6,626 070 15 × 10^{-34} quand elle est exprimée en s^{-1} m^2 kg, ce qui correspond à des J s. »[159]

La valeur actuelle recommandée par le CODATA 2010 pour la constante de Planck h, qui a été accepté comme valeur exacte lors de la CGPM de 2018 par tous les signataires de la convention du SI, est 6.626 069 57 x 10^{-34} Js.

La nouvelle définition du kilogramme a pour conséquence d'établir un lien de dépendance entre le kilogramme et deux unités primaires : le mètre et la seconde dans la mesure où d'une part la dimension de la constante h est dérivé de ces deux unités, et d'autre part sa mise en pratique, dans la procédure de mesure de la constante h et du kilogramme par le moyen de la balance du Watt, met en œuvre des mesures utilisant ces deux unités.

Empiriquement, la mesure de cette constante peut être réalisée selon deux méthodes différentes : la première en utilisant la balance du watt complétée par deux instruments de mesure utilisant deux phénomènes purement quantiques, et la seconde à partir d'un calcul utilisant le résultat de la mesure empirique de la constante d'Avogadro Na par des moyens de diffraction, des phénomènes optiques. De ces deux méthodologies de mesure, les métrologues obtiennent, comme nous l'avons vu, deux valeurs incompatibles, bien que très proches. L'existence de cette différence est attestée par l'écart significatif, et non réductible à ce jour, des valeurs obtenues pour la valeur de la constante h. Si nous ne considérons que les formules mathématiques conduisant au calcul de la constante h et déduites, d'une part de l'architecture de la balance du Watt et d'autre part de la mesure préliminaire de la constante d'Avogadro Na par un comptage du nombre d'atomes dans la sphère homogène de silicium 28, alors les deux voies de détermination de la valeur de h nous semblent équivalentes et devraient selon la logique mathématique conduire à une même valeur numérique, aux erreurs de mesures près.

Mais les deux théories utilisées mettent en œuvre plusieurs théories différentes :

Le dispositif de la balance du Watt utilise la mécanique classique pour le principe de la balance, l'électromagnétisme classique de Maxwell pour le calcul de la force exercée sur la bobine dans le champ magnétique et deux phénomènes purement quantique, les effets Josephson et Hall quantique,

Le dispositif mesurant la constante de Planck par comptage des atomes d'une sphère de silicium 28 met en œuvre l'optique classique des phénomènes de diffraction, et des relations de la physique atomique.

Elles sont supposées conduire aux mêmes résultats, à une même valeur numérique, si le domaine de mesure reste macroscopique permettant d'éliminer les aspects statistiques des résultats d'une mesure.

Selon les métrologues, l'écart observé proviendrait, soit d'un biais de mesure non pris en compte, car non répertorié comme cause possible d'erreur, soit d'une limite de validité atteinte dans l'une des théories mises en œuvre.

Nous avons expliqué que le choix de la constante h, comme fondement de l'unité de masse, reposait en partie sur l'utilisation souhaitée d'une des constantes fondamentales de la physique quantique afin d'obtenir le consensus des physiciens, ingénieurs et industriels d'une importante composante de l'économie moderne, celle de l'électronique et de l'informatique. Si ce choix découle de considérations technologiques (les technologies adaptées au degré de précision

[159] CGPM de novembre 2018, résolution sur la définition de l'unité de masse.

recherché dans le monde microscopique reposent sur la mesure soit du rapport h/m, soit de la mesure des valeurs des grandeurs électriques par les effets quantiques Hall et Josephson) et politique, le lien conceptuel entre la constante de Planck, le quantum d'action, et la masse comme interaction de la matière avec un champ scalaire du vide, le champ de Higgs n'est pour le moins pas évident.

Or, est-il souhaitable dans un souci de lisibilité de n'utiliser, pour la définition de chaque unité, que des constantes présentant un lien clair avec la grandeur dont on cherche à définir l'unité ? En dehors des masses des particules qui, nous l'avons montré, ne pouvaient pas être retenue comme fondement de la définition du kilogramme, il ne restait que la constante de Planck h, grandeur fondamentale des théories quantiques. Ce quantum d'action, intervient dans la théorie quantique des champs, donc dans le modèle standard de la physique quantique qui explique la masse comme une caractéristique de la matière résultant de l'interaction entre deux champs : le champ, représentatif de la particule elle-même, et le champ scalaire de Higgs, attaché à la nature du vide selon le modèle quantique. La constante fondamentale sur laquelle repose la définition du kilogramme est donc la seule pour les physiciens et métrologues, en dehors de celles déjà utilisées par le SI[160], dont le lien explicatif avec la nature de l'unité décrite n'est pas évident : par exemple, le mètre est lié à un temps de vol représenté par la vitesse de la lumière c, la seconde l'est par l'intermédiaire du saut énergétique entre deux niveaux de l'atome de césium conduisant à une fréquence, la mole est lié à un nombre d'objets identiques, la température à la constante de Boltzmann qui assure la transformation entre température et énergie, l'ampère est lié à la charge de l'électron qui est le quantum de charge électrique.

Une action ne représente ni une masse, ni même son équivalent énergétique traduit par la relation énoncée par Einstein[161] en 1905 par la relation :

$$E = mc^2$$

Pour Lagrange, en 1788[162], l'action d'un corps soumis à un potentiel (la gravité, les forces électromagnétiques par exemple), la quantité que la trajectoire réelle minimise à intervalle de temps donné, correspond à la moyenne de la différence entre énergie cinétique (T) et énergie potentielle (U). Selon le modèle quantique, l'acquisition d'une caractéristique de masse par un ensemble de particules de matière est la conséquence du transfert d'une quantité d'énergie prise au vide vers cet ensemble de particules. La justification du choix de la constante h est donc la conséquence de cette explication du concept de masse par la physique quantique. Cette explication quantique de la masse d'une particule n'est aujourd'hui qu'une hypothèse proposée pour trois particules : les trois bosons de l'interaction faible, les bosons W^0, W^+ et W^-. Les masses associées aux autres particules et celle nulle des bosons de l'interaction forte restent une question ouverte. Bien qu'ainsi le choix de la constante h ne semble pas le meilleur, les contraintes technologiques, notamment celles de la précision de mesure requise, justifient aux yeux des ingénieurs, physiciens et métrologues l'adoption de cette constante comme fondement de la définition de l'unité de masse. Nous reviendrons sur le concept de masse et l'utilisation de la constante de Planck dans le chapitre suivant.

La définition du kilogramme proposé par la CGPM de 2018 n'établit aucun lien entre le quantum d'action et le concept de masse :

« Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h, égale à 6,626 070 15 × $^{10-}$34 lorsqu'elle est

[160] Les définitions des unités du SI, validées en novembre 2018 et entrées en application en mai 2019, sont explicités sur le site du BIPM : www.bipm.fr

[161] Einstein A., 1905, [Manuscript received: 27 September 1905], written at Berne, Switzerland, "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" [Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?], Annalen der Physik (Berlin) (in German), Hoboken, NJ (published 10 March 2006), 323 (13), pp. 639–641

[162] Lagrange J.-L., 1788, mécanique analytique, à paris chez la veuve Desaint, libraire, rue du foin St. Jacques

exprimée en J s, unité égale à kg m2 s^{-1},le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et ΔνCs. »[163]

La mise en pratique de cette nouvelle définition renvoie aux deux dispositifs actuellement aptes à mesurer les masses avec le degré de précision requis par le SI : la balance du watt et la mesure de la constante d'Avogadro par comptage des atomes d'une sphère de silicium 28 homogène et cristallisé selon un unique cristal. La constante h n'est donc pas un simple facteur de conversion mais une quantité dont la nature, selon les physiciens de physique fondamentale, est en relation avec le concept de masse tel que la science physique actuelle le comprend au travers du modèle standard. La relation obtenue à partir de la mécanique newtonienne et de la physique quantique est :

$$h = \frac{4mgv}{A}$$

Où A est, comme nous l'avons expliqué plus haut, une fonction des deux grandeurs quantiques, la constante de Josephson et celle de Von Klitzing.

Il est probable que lorsque la physique quantique et la relativité auront établit un lien de causalité, direct ou réciproque, et qu'une théorie unificatrice sera établie, alors les métrologues seront conduits à modifier la définition du kilogramme en se fondant sur le nouveau paradigme, sur la ou les nouvelles théories physiques et peut être en optant pour une autre constante fondamentale plus représentative du concept de masse. Car aujourd'hui, comment soutenir que le choix pour l'unité du kilogramme de la constante h, qui représente le quantum d'action, est le reflet des lois de la Nature ?

Systèmes d'unités naturelles

Au-delà des intérêts économiques et des contraintes technologiques auxquels sont soumises la constitution et les adaptations successives d'un système d'unités de mesure à la réalité de la société dans laquelle nous vivons, les physiciens ont depuis longtemps caressé le rêve d'un système d'unités de mesure absolu reposant sur des grandeurs dont la constance était certaine, des grandeurs que tous les théoriciens et expérimentateurs s'accorderaient à reconnaître comme une base solide et pérenne satisfaisant à la condition fondamentale d'indépendance spatiotemporelle. Les constantes fondamentales sont très vites apparues comme des objets physiques aptes à constituer un tel socle de stabilité comme nous l'avons vu au chapitre 2.

Nous avons montré que les constantes fondamentales, et plus particulièrement le sous-groupe des constantes Universelles, pouvaient être considérées comme représentatives d'aspects de notre réalité plus fondamentaux que ceux décrits par les théories fondamentales constitutives du socle paradigmique de la physique moderne : la relativité, la mécanique quantique, l'électromagnétisme et la physique statistique. Mais ces constantes fondamentales peuvent également être considérées comme contingentes d'une part des choix faits de ces unités et d'autre part des modèles mathématiques utilisés pour construire ces théories physiques. Enfin, ces constantes fondamentales ne peuvent pas être considérées comme représentatives d'un absolu car leur classement, selon les catégories définies par Levy Leblond, dépend de la mise en évidence de lois physiques nouvelles telle que, par exemple, la relativité qui a englobé la mécanique Newtonienne et de ce fait modifié le classement de la constante de gravitation G, un consensus s'étant dégagé pour la faire passer dans la catégorie C des constantes dites fondamentales. Si une théorie synthétisant mécanique quantique et relativité, par exemple, était découverte les constantes c et h pourraient être remplacées par une ou plusieurs constantes encore inconnues et caractéristiques de cette théorie unificatrice. Par contre nous avons reconnu un caractère nécessaire à ces constantes car leurs apparitions dans les relations formelles ne

[163] https://www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9.pdf

sont pas contingentes : un changement d'unités de mesure ou de dimensions ne peut pas les faire disparaitre, tout au plus modifier leurs valeurs et la façon dont elles vont apparaître.

Ainsi le caractère « absolu » des constantes ne peut être que temporaire, dépendant de l'évolution de nos connaissances et de notre compréhension du monde physique, alors que leur nécessité est démontrée.

Les systèmes d'unités naturels

Tous les systèmes d'unités conçus historiquement depuis l'antiquité ont reposé d'abord sur des critères anthropocentriques ou sociétaux (longueur d'un membre d'une personnalité au prestige incontesté, volume d'un objet choisi par l'autorité royale, ….) puis, plus récemment, sur un système de lois de la nature considéré comme suffisamment Universel pour être accepté par le plus grand nombre de personnes quel que soit leur rôle ou leur statut dans la société (le SI obéit à cette seconde définition dans la mesure où il repose sur des lois de la mécanique, de l'optique, de la mécanique quantique ou de la physique statistique). Mais même dans cette conception d'un système de mesure, un tel système d'unités reste entièrement lié à nos usages humains, à notre façon de percevoir et donc de comprendre l'Univers, et ne pourrait sans doute pas être reconnu comme acceptable par une intelligence extra-terrestre.

Afin de disposer d'une telle référence absolue, commune à toutes formes de vie, correspondant mieux à la Réalité profonde de notre Univers, il a semblé raisonnable aux physiciens de définir un système d'unités de mesure reposant sur des considérations physiques dont la validité peut être acceptée partout dans l'Univers. Le choix d'un tel système, construit à partir des seules constantes fondamentales ou Universelles, répond à ce souci d'une généralité absolue, bien que l'on puisse objecter que les dimensions de ces constantes nécessitent la définition préalable d'un système d'unités lié à la Nature et à notre perception toute humaine. En effet, établir un système d'unités reposant sur un ensemble restreint de constantes dimensionnées suppose que ces dimensions soient elles-mêmes liées à un système d'unités fondé sur des lois naturelles. Les constantes n'existent qu'au travers du formalisme mathématique que nous utilisons pour expliquer les théories physiques et réaliser des prédictions empiriquement vérifiables. Les dimensions que nous considérons nécessaires pour décrire la réalité perçue ne sont que la conséquence de l'expression de nos sens et de leurs prolongements au travers des instruments et dispositifs de mesure. Ainsi, toute tentative de création d'un système d'unités absolues à partir d'un groupe de constantes est vouée à l'échec car ces mêmes constantes sont le résultat conjugué d'une part du formalisme mathématique que nous avons choisi et qui est lié à notre système mental de représentation, et d'autre part de la limitation de notre perception sensorielle du monde. Nous appartenons au monde et ne pouvons par conséquent en prendre la mesure pleine et entière.

Comment choisir ces constantes et combien seront nécessaires ? De nombreuses combinaisons de constantes sont possibles et plusieurs ont fait l'objet d'un choix délibéré de la part des physiciens pour diverses raisons comme par exemple l'appartenance des constantes choisies aux théories les plus fondamentales du moment, ou comme une profonde conviction qu'un ensemble de constantes particulier nous rapproche de la nature profonde de cette Réalité. La raison de ce choix n'est jamais justifié par des considérations physiques mais plutôt par une croyance en une prédominance de certaines constantes sur d'autres : par exemple, si Planck va privilégier les constantes c, h et G, Johnston-Stoney va lui choisir la charge de l'électron e comme la plus importante, la plus représentative de cette vérité sous-jacente à notre réalité observée, et va remplacer la constante h, inconnue alors, par cette charge de l'électron e qu'il pensait la plus fondamentale dans le cadre des théories physiques. Combien de constantes sont-elles nécessaires pour constituer un système d'unités ? Nous avons vu que trois dimensions sont suffisantes pour construire la dimension de toutes les grandeurs connues : les longueurs, les durées et les masses. Il est ainsi raisonnable de penser que trois constantes devraient être

suffisantes pour construire un système d'unités complet à condition que ces unités comportent dans leurs dimensions ces trois dimensions nécessaires, seule ou en combinaison.

Cependant, cette limitation d'un ensemble limité à trois constantes relève d'un choix purement conventionnel. Nous avons vu plus haut (§ 3.3) qu'il est possible de réduire le nombre de dimensions et le nombre de constantes nécessaires à la constitution d'un système d'unités mais au prix d'une perte importante d'informations sur notre réalité, ce choix réduit agissant comme une projection de notre Univers sur un espace comportant un nombre inférieur de dimensions primitives.

À l'inverse, il est possible de définir un système d'unités capable de mesurer l'ensemble des grandeurs observables à l'aide d'un nombre de constantes supérieur ou égal à trois ; c'est un choix arbitraire qui repose sur des conditions spécifiques, intuitives et déductive, telles que par exemple, l'intime conviction d'une plus grande généralité, d'une simplicité d'utilisation accrue ou une meilleure adaptation aux dispositifs de mesure utilisés. Les systèmes d'Hartree et de Ludovici appartiennent à cette catégorie comme nous allons le voir alors que les systèmes proposés par Johnston-Stoney, Bohr et Planck, qui tous utilisent trois constantes fondamentales, recherchent la concision et une représentation plus proche de la réalité perçue, non la Réalité. Nous terminerons par l'analyse d'un système dérivé du système de Planck dans lequel nous allons tenter de remplacer la constante G par la charge unitaire e de l'électron.

Le système de Johnston-Stoney

Ce système se fonde sur le choix contingent des trois constantes e, c et G comme constantes fondamentales fondatrices du système d'unités dont les autres ne sont que des dérivées. Il est le premier système naturel d'unité[164] proposé et énoncé en 1874 ; il ignore bien sur la théorie quantique dans tous ces aspects. La constante de Planck h était à l'époque encore inconnue. Le choix de ces constantes est donc représentatif de la connaissance à un instant donné de la physique théorique, celle de la fin du 19ème siècle avant les révolutions de pensée relativiste et quantique. Les trois unités de base obéissent aux relations suivantes :

$$M_j = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G}} = 1{,}85\ 10^{-9}\ \text{kg}$$

$$L_j = \sqrt{\frac{Ge^2}{4\pi\varepsilon_0 c^4}} = 1{,}37\ 10^{-36}\ \text{m}$$

$$t_j = \sqrt{\frac{Ge^2}{4\pi\varepsilon_0 c^6}} = 4{,}59\ 10^{-45}\ \text{s}$$

Les valeurs numériques obtenues pour ces unités n'étaient bien évidemment pas mesurables en laboratoire à cette époque. La mesure de telles quantités, aujourd'hui, avec une précision suffisante pour répondre aux critères minimums de la métrologie, et à la pratique quotidienne des mondes de l'industrie et de la recherche, serait hors de nos capacités technologiques. Ce caractère d'inutilisabilité en fonction des technologies existantes a entraîné le rejet d'un tel système d'unités, ce qui montre à quel point il existait, et il existe toujours, une divergence entre physiciens théoriciens et le monde des utilisateurs tourné vers les seules technologies. Le pragmatisme des intérêts économiques ayant gagné la bataille, l'idée même de ce système d'unités a été rejetée.

Le système de Planck

Nous poursuivons cette courte description par le système d'unités naturelles de Planck, le plus utilisé aujourd'hui notamment par les physiciens des particules pour lesquels il constitue

[164] Johnstone-Stoney G.,1874, discours intitule "On the physical units of Nature", devant l'association britannique pour l'avancement des sciences, publié dans Philosophical Magazine 381, 1881

un système adapté aux grandeurs mesurées par les dispositifs utilisant les technologies modernes : les accélérateurs de particules et les collisionneurs.

Le système proposé par Planck présente deux différences notables avec celui de Johnstone-Stoney :

Il fait clairement référence à la nouvelle physique quantique en introduisant la constante h,

Il remplace la permittivité du vide ε_0 par la célérité de la lumière dans le vide c,

Il n'utilise pas la charge élémentaire e de l'électron.

En introduisant la constante h Planck[165] fait remarquer que :

« *La constante h offre la possibilité d'établir des unités pour la longueur, la masse, le temps et la température indépendantes des corps ou des matériaux particuliers, et qui gardent nécessairement leur signification pour toutes les époques et pour toutes les civilisations, même extra-terrestres et non humaines, des constantes qui peuvent donc s'appeler les unités physiques fondamentales de la mesure.* »

Avec :

$M_p = \sqrt{\frac{hc}{G}} = 5{,}45\ 10^{-8}$ kg

$L_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 4{,}04\ 10^{-35}$ m

$t_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 1{,}35\ 10^{-43}$ s

$T_p = \frac{1}{k}\sqrt{\frac{hc^5}{G}}$ °K

La ressemblance entre ces deux systèmes d'unités de mesure est frappante : ils ne diffèrent que d'un facteur $h = \frac{e^2}{c}$ comme le fera remarquer Einstein :

« Il me semble que de h = e²/c nous pouvons conclure que la même modification de la théorie qui contient le quantum élémentaire e parmi ses conséquences, contiendra également la structure quantique du rayonnement. »[166]

Le système de Planck va attendre de nombreuses années avant que les physiciens théoriciens lui trouvent sa justification dans les théories modernes de la cosmologie et en particulier des premiers instants de l'Univers pendant lesquels la totalité de la matière baryonique a été extraite du vide. Cette justification, qui fondée sur l'interprétation qui est faite dans le cadre de cette théorie cosmologique, porte sur les valeurs obtenues dans ce système d'unités naturelles pour l'unité de longueur et celle de temps principalement ; la première donnant une valeur limite en deçà de laquelle les lois de la physique actuelle ne sont plus utilisables, domaine où nous ne pouvons plus que conjecturer des événements conduisant à une explication acceptable dans notre logique de ce début de 21ème siècle, la seconde donnant, selon eux, l'ordre de grandeur de la période dite d'inflation pendant laquelle le modèle cosmologique standard situe le phénomène de l'extraction de toute la matière présente à ce jour dans l'Univers. Le système de Johnston-Stoney conduit à des valeurs d'unités de longueur et de temps très voisines ; il pourrait donc s'attribuer la même justification que celui de Planck. Il ne nous semble pas possible dans ces conditions de conclure à la meilleure adéquation du système de Planck avec la physique actuelle, ce choix ne relevant pas de critères sélectifs mais plutôt subjectifs.

Ces valeurs numériques obtenues pour les unités de longueur et de temps dans le système de Planck n'établissent pas de correspondance certaines avec des grandeurs mesurées de notre réalité ; elles sont utilisées pour supporter certaines des hypothèses avancées dans le cadre de

[165] Planck M., 1959, Vorlesungen über die Theorie der Waermestrahlung ,1914, traduction Theory of heat radiation, p. 174

[166] Einstein A., 1905 lettre à Paul Ehrenfest et 1909, *Phys. Zeit.* 10, 192 ; Einstein A., 1909, On the development of our understanding of the nature and composition of radiation, Physikalische ZeitschriftVol. 10. No. 22, pg. 817

la théorie cosmologique standard qui repose en partie sur des hypothèses de valeurs concordantes avec ce système de Planck, notamment celle définissant la valeur minimale en deçà de laquelle la physique quantique n'est plus valable et que les physiciens associent à l'unité de longueur de Planck (10^{-35} m). Les physiciens théoriciens avancent l'hypothèse que les lois quantiques cessent d'être valables pour des distances au-delà de cette limite, mais aucun calcul, ni aucune théorie physique, ne viennent corroborer cette valeur de Planck. De même, le temps de Planck, voisin de 10^{-44} s suggère une cohérence avec la physique quantique et le modèle de l'inflation, mais ne découle d'aucune théorie physique ni d'aucune résultats empiriques ; cette valeur est simplement du bon ordre de grandeur selon le paradigme actuel, rien de plus. L'utilisation du système d'unités de Planck pour justifier certaines théories physiques relève plus, selon nous, d'une ontologie, d'une métaphysique, car rien ne démontre que ces valeurs correspondent à une réalité profonde ; ce ne sont que des hypothèses ne reposant que sur une profonde conviction, un choix en accord découlant de ce paradigme physique actuel.

Le système de Hartree

Le système proposé par Hartree repose, lui, sur quatre constantes :
La masse m_e de l'électron,
Le quanta d'action réduit $\hbar = h/2\pi$,
La charge électrique e de l'électron,
La permittivité diélectrique du vide ε_0.

De ces quatre constantes on déduit facilement les unités de longueur, de temps, d'énergie et celle dérivée, par exemple de vitesse :

Unités dérivées	Définitions	Valeurs numériques
Vitesse	$\frac{a_0}{T_0} = \frac{e^2}{2h\varepsilon_0}$	2.2×10^6 m/s
Temps	$T_0 = 2\varepsilon_0^2 h^3/\pi\, m_e e^2$	2.4×10^{-17} s
Énergie	$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_0}$	4.9×10^{-18} J
Longueur	$a_0 = \frac{h^2\varepsilon_0}{\pi m_e\, e^2}$	5.3×10^{-11} m

Où a_0, grandeur définie comme l'unité de longueur, représente le rayon de l'atome de Bohr.

Dans ce système d'unités, les unités de base, les unités dites primaires, ne correspondent pas aux grandeurs usuelles, celles qui dérivent directement de la nature de nos sens ; elles sont le résultat d'un processus mental d'analyse au terme duquel Hartree a retenu deux grandeurs atomiques, une caractéristique du vide et le quanta d'action, un des piliers conceptuels de la mécanique quantique.

La vitesse unité est très voisine de la vitesse de la lumière, mais les unités dérivées de temps et de longueur sont nettement plus importantes que celles déduites des systèmes de Planck ou de Johnston-Stoney. Elles sont dans le domaine des temps et longueurs observés en physique atomique. Ce système d'unités de mesure, construit à partir de grandeurs appartenant toutes au monde microscopique est adapté aux actes de mesures du monde microscopique. Ce système bien que conventionnel est dérivé de notre SI car il suppose connu et mesuré les quatre grandeurs qui lui servent de base. Il peut ainsi être considéré comme un système d'unités dérivé du SI.

On peut se demander pourquoi Hartree a soutenu un tel système d'unités. Ce système repose principalement sur l'électron, deux de ses caractéristiques importantes : sa masse et sa charge. L'électron est la seule particule sans structure qui possède à la fois une masse et une charge. La masse est une forme d'énergie et la charge est la cause de l'électromagnétisme qui décrit les comportements des ondes, des liaisons chimiques de toutes les molécules, et qui constitue une des bases du raisonnement qui a conduit Einstein à la formulation des lois de la relativité. Choisir ces deux caractéristiques de l'électron semble ainsi relevé d'une simple logique ; pour compléter ce choix de constantes à la base d'un système d'unités, le choix de la constante de Planck h procède également d'un même raisonnement en réunissant le monde classique (ou relativiste) avec le monde quantique. Cependant avec ces trois seules constantes, il n'est pas possible de construire un système d'unités décrivant l'ensemble des quantités ; il faut compléter ce groupe de trois constantes par une quatrième qui en coopération avec les trois autres permettront de définir les dimensions les grandeurs présentes dans notre Univers, au moins celles que nous pouvons observer. C'est pour cette raison que la permittivité du vide, liée à la vitesse de la lumière, est ajoutée. Ce n'est pas parce que cette constante est particulièrement importante, mais elle est nécessaire pour construire l'homogénéité dimensionnelle du système d'unités de mesure. Si l'on fait abstraction de cette quatrième constante, le groupe des trois constantes retenues est proche de ceux de Planck et de Johnston-Stoney. Le système de Hartree remplace la constante de gravitation G du premier par h et cette même constante G par la charge e de l'électron dans le second. Pour Hartree la constante G ne semble pas avoir sa place dans un système d'unités naturelles capable de décrire la réalité de l'Univers.

Ce système est-il plus fondamental que ceux soutenus par Johnston-Stoney et Planck, la question reste ouverte. Nous avons vu que les valeurs numériques, en particulier pour les longueurs et le temps, sont très différentes de celles issues du système d'unités de mesure de Planck. L'unité de temps est trop importante pour constituer une limite de validité d'une des

deux théories fondamentales de la physique et l'unité de longueur, qui est approximativement celle du diamètre d'un atome, ne représente pas la limite de validité de la théorie quantique ou relativiste. Donc même si la question reste ouverte, il est peu probable que ce système offre une meilleure représentation de la réalité que celui de Planck, notamment.

Le système de Ludovici

Le système proposé par Ludovici diffère de celui de Hartree. Il utilise également quatre constantes : la constante de Gravitation G, la charge de l'électron e et la permittivité électrique ε_0 et magnétique μ_0 du vide. Ces deux dernières constantes sont liées, comme nous le savons, avec la constante c ($c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$). On peut ainsi comparer le système de Ludovici et celui de Planck ; ils diffèrent l'un de l'autre par l'échange des constantes e et h. nous retrouvons ainsi les mêmes questions pour ce système particulier que celles que nous venons de faire pour le système d'Hartree.

Dans le système de Ludovici, les unités de longueur, de masse et de temps ont des dimensions dérivées de celles, primitives, que l'on peut attribuer conventionnellement aux constantes choisies. Elles s'expriment par les expressions :

$L_l = G^{1/2} e \mu_0 \varepsilon_0^{1/2} = 4.9 \times 10^{-36}$ m

$M_l = G^{-1/2} e \varepsilon_0^{-1/2} = 6.6 \times 10^{-9}$ kg

$T_l = G^{1/2} e \mu_0^{3/2} \varepsilon_0 = 1.6 \times 10^{-44}$ s

On retrouve des valeurs numériques très proches de celles obtenues pour les systèmes de Planck et de Johnston-Stoney. L'obtention de valeurs numériques d'unités proches avec des systèmes d'unités utilisant des constantes différentes a-t-elle une signification particulière ? Nous ne le pensons pas.

Le système de Bohr

Comme il est toujours possible d'exprimer les dimensions des constantes les unes en fonction des autres, ces systèmes sont équivalents, chacun de ces groupes de constantes permettant la constitution d'un système complet d'unités. Leur principale différence repose sur le choix contingent de l'ensemble des constantes de base, opération qui relève d'un subjectivisme de son auteur et de sa sensibilité personnelle. On peut d'ailleurs rapprocher le système de Planck et celui de Johnston-Stoney du système de Bohr, assez similaire et qui utilise m_e, e et h comme constantes fondamentales. Ce système d'unités est défini de la façon suivante :

$L_B = \frac{h^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} = 2{,}1\ 10^{-9}$ m

$t_B = \frac{h^3 (4\pi\varepsilon_0)^2}{m_e e^4} = 6{,}0\ 10^{-15}$ s

$M_B = m_e = 9{,}1\ 10^{-31}$ kg

Le choix de Bohr est essentiellement quantique et c'est probablement pour cette raison qu'il rejette la constante de la gravitation G. ses unités reposent sur sa description de l'atome avec des orbites électroniques discrètes. De ce fait son système est entièrement dédié au monde microscopique, à la représentation qu'il s'en fait et qui selon lui décrit le mieux la réalité profonde de l'Univers. Les valeurs numériques des unités de masse, de longueur et de temps présentent un écart significatif avec celles des systèmes de Planck ou de Johnston-Stoney. En particulier, l'unité de longueur est proche du rayon atomique et l'unité de temps correspond à des fréquences de transition entre niveaux d'énergie assez éloigné, dans le domaine hyperfréquence.

Contrairement au système de Planck, les unités de mesure de Bohr ne trouvent pas leur interprétation dans le domaine de la cosmologie, les valeurs des unités de longueur et de temps étant trop éloignées des hypothèses sur lesquelles reposent les hypothèses cosmologiques actuelles. Elles restent dans le domaine quantique lié aux transitions entre niveaux d'énergies

de l'atome. Ce système d'unités de mesure est donc d'un usage plus limité que celui de Planck par construction.

D'autres modèles pourraient être construits à partir de trois constantes fondamentales, mais leur apport en termes de connaissances nous semble assez limité, ces systèmes d'unités naturels de mesure étant construit à partir d'une part un ensemble de constantes dont nous ne pouvons pas être certain qu'il est complet, et d'autre part un système de dimensions et d'unités de mesure préalable qui revêt un caractère nécessairement contingent.

Résumons les valeurs numériques obtenues dans ces différents systèmes d'unités :

Système d'unités	Constantes	Longueur (m)	Temps (s)	Masse (kg)
Ludovici	G, e, $\varepsilon_0, \mu_0 = \frac{1}{c^2\varepsilon_0}$	4.9×10^{-36}	1.6×10^{-44}	6.6×10^{-9}
Johnston-Stoney	G, e,c, ε_0	1.37×10^{-36}	4.59×10^{-45}	1.85×10^{-9}
Hartree	m_e, e, h, ε_0	5.3×10^{-11}	2.4×10^{-17}	0.91×10^{-30}
Bohr	m_e, e, h	2.1×10^{-9}	6.0×10^{-15}	0.91×10^{-30}

Nous constatons que les systèmes de Johnston-Stoney et de Ludovici conduisent à des valeurs numériques proches de celles du système de Planck pour ces trois unités considérées par le SI comme fondamentales. Les valeurs numériques obtenues pour ces trois mêmes unités dans les systèmes de Hartree et Bohr sont également proches mais très éloignées de celles obtenues dans le système de Planck. Il est remarquable de constater que tous ces systèmes proposés se limitent à deux groupes de constantes : un premier constitué de G, e ε_0, μ_0 et un second de m_e, e, h, ε_0. Ces deux groupes diffèrent principalement par la permutation des constantes G et c avec m_e et h. Le premier considère une approche mécaniste de type classique ou relativiste alors que le second est résolument tourné vers une description quantique de la réalité. Le système de Planck qui tente de faire une synthèse des deux théories fondamentales conduit à des valeurs numériques des trois unités fondamentales : longueur, temps et masse, exprimées dans le SI actuel, voisines de celles obtenues par le premier groupe.

Le système d'unités naturelles de Planck modifié

Nous soutenons, dans cette étude, l'idée, développée plus haut que la charge de l'électron devrait être considérée comme une constante Universelle alors que la constante de gravitation G n'était peut-être pas une constante fondamentale et qu'elle pourrait valablement être remplacée par la constante composite G' de la relativité générale, constante G' définie par la relation :

$$G' = \frac{8\pi G}{c^4}$$

Mais nous avons également fait remarquer que des récentes mesures de la constante G semblaient présenter une dispersion dans les mesures empiriques apte à semer le doute dans les esprits des physiciens et métrologues quant à la constance de cette grandeur.

Nous avons proposé que la charge unité portée par l'électron, ou le positron son antiparticule, soit considérée comme une constante Universelle. Est-il alors possible de construire un système d'unités naturelles en substituant simplement à la constante G la charge élémentaire e et en gardant les autres constantes utilisées par Planck : h et c ?

Les trois constantes que nous envisageons d'utiliser ont les dimensions suivantes dans le système d'unités de mesure international :

$$c : \frac{[L]}{[T]}$$
$$h : [M][L]^2[T]^{-1}$$
$$e : [M]^{1/2}[L]^{3/2}[T]^{-1}$$

De ces relations dimensionnelles nous pouvons logiquement déduire qu'un système naturel d'unités ne peut être construit avec ces seules constantes car ces relations aux dimensions présentent une circularité. Les dimensions des constantes sont déterminées par un système d'unités préalable que nous appelons ici primaire, et qui va conditionner la possibilité ou l'impossibilité de l'obtention de l'élaboration d'un système d'unités naturelles à partir d'un ensemble de constantes choisies.

Que conclure d'une telle situation ? En premier lieu que les bases d'un système d'unités naturelles ne peuvent se construire à partir d'un ensemble quelconque de constantes, ensuite que certains couples de constantes jouent un rôle similaire dans un système d'unités et donc ne peuvent être utilisées ensemble. Ce lien dimensionnel entre plusieurs constantes, comme celui que nous venons d'établir par le groupe de trois constantes h, c et e conduit en effet à la relation :

$$[h][c] = [e^2]$$

Relation, déjà comprise par Einstein, et qui semble vouloir nous indiquer un lien fondamental entre ces trois constantes, lien au-delà des théories de la mécanique quantique et de la relativité, nous obligeant à ajouter une quatrième constante à ce jeu initial. Il est important de noter que ces trois constantes présentent toutes un lien avec le vide-espace-temps, origine des objets matériels.

Nous pouvons également faire remarquer que cette circularité constatée entre les équations aux dimensions attachées à ces trois constantes est contingente du choix des dimensions primaires, de leurs natures qui va avoir pour conséquence logique l'établissement d'un système de dimensions dans lequel seront exprimées les constantes fondamentales. Cette circularité n'est constatée ici que pour un système dimensionnel donné ; en serait-il de même pour tout autre système dimensionnel ? La question reste ouverte.

Existence d'un système naturel absolu

Dans aucun de ces systèmes d'unités naturelles proposés, le nombre de vecteurs de base n'est réduit. La valeur numérique de chaque quantité attachée aux grandeurs fondamentales, de chaque unité, peut être choisie comme égale à l'unité. Aucune réduction du nombre de grandeurs de référence ou de constantes ne peut être induite, et ainsi aucun de ces systèmes n'apparaît meilleur que les autres.

Pour illustrer cette position reportons-nous à un système d'unités particulier. Les physiciens ont choisi comme référence celui de Planck qui est celui le plus utilisé, et le plus reconnu par les théoriciens de la physique. Ce système est constitué à partir uniquement de trois constantes : G la constante de gravitation, c représentant la vitesse de la lumière dans le vide et le facteur de conversion entre l'énergie et la matière, h la constante de Planck. Chacune de ces constantes est définie par une valeur numérique, représentée par un nombre réel, et une dimension composite constituée à partir de celles choisies pour les unités du SI. Ainsi le système de Planck est dépendant du système d'unités internationales utilisé par le monde industriel, économique et de la recherche. Il en sera de même pour tout système d'unités formé à partir d'un jeu minimum de constantes. Tout système d'unités comporte une part de conventionnalisme et aucun système naturel d'unités de mesure ne pourra revendiquer un caractère absolu.

Le système naturel d'unités de Planck est défini à partir d'une part d'un jeu ad hoc de constantes universelles mais également d'unités qui caractérisent la valeur numérique et la dimension de ces constantes. Un tel système serait-il compréhensible par des êtres vivants sur une autre planète et ne nous ressemblant que peu, probablement pas sauf à posséder le même système de perception que nous et de ce point de vue être proche de ce que nous nommons les hominidés. La définition d'un système naturel d'unités qui pourrait être admis par la majorité des êtres vivants et pensant peuplant l'Univers devrait pour cela réunir deux conditions :

Choisir un jeu de constantes fondé sur la totalité des grandeurs physiques existantes dans l'Univers, le rendant incontestable pour d'autres formes de vie et dans lequel ces constantes vont s'exprimer,

Définir un système d'unités de mesure capable décrire toutes les unités de mesure primaires nécessaires à la compréhension de la Réalité.

Un système d'unités, fondé exclusivement sur un ensemble réduit de constantes, pour être qualifié d'absolu, doit ainsi représenter la synthèse globale des grandeurs physiques. Cette synthèse finale comprendrait-elle une seule ou plusieurs lois ? Certains physiciens[167] de ce début du 21ème siècle pensent qu'une seule loi sera nécessaire pour réaliser la synthèse des interactions entre les éléments matériels. D'autres[168] soutiennent l'idée que nous buteront toujours sur une limite d'inconnaissabilité nous interdisant la formulation d'une loi unique décrivant la réalité qui nous entoure, rendant ainsi l'existence d'un système naturel d'unités absolu inatteignable :

« *Les propriétés du monde ne sont pas forcément identifiables ou calculables. Par exemple, celle d'être un énoncé vrai dans un système mathématique particulier n'est ni indentifiable ni calculable. On peut approximer la vérité avec une précision toujours meilleure en introduisant toujours plus de règles de raisonnement et d'hypothèses axiomatiques, mais on ne peut jamais la capturer au moyen d'un ensemble fini de règles. Les attributs ni identifiables ni calculables – les traits « prospectifs » du monde – sont ceux que nous ne pouvons ni reconnaître ni générer par une série de pas logiques.* »[169]

Tout système d'unités de mesure, même s'il est défini à partir de lois naturelles les plus générales comme la réforme du SI le soutient, restera lié aux seules grandeurs auxquelles nos sens nous donnent accès. La combinaison du toucher, de la vue, de l'ouïe sont la base des dispositifs de mesure : les écrans informatiques, les impressions sur papier, les capteurs de pressions ou de températures notamment en sont le reflet. On ne peut comprendre que ce que l'on connaît et l'on ne connaît que ce qui est accessible directement ou indirectement par l'intermédiaire de nos sens.

Vouloir remplacer le SI par un système naturel d'unités de mesure formé des seules constantes est une chimère. Le caractère indissociable d'un quelconque système d'unités, reposant sur des constantes, est avéré par cette dépendance conceptuelle entre la nature des constantes et d'une part le système d'unités et de dimensions primitives utilisé pour les mesurer, et d'autre part les théories physiques associées aux phénomènes observées, modélisées par des théories mathématiques élaborées par notre intelligence, elle-même conditionnée par les interactions de nos sens avec la réalité perceptible. La conséquence est celle que nous avions avancé plus haut de façon peut être un peu rapide : il est impossible de concevoir un système absolu d'unités uniquement fondé sur un ensemble de constantes sans lui adjoindre un système d'unités reposant sur des lois de la nature, donc sur des phénomènes observés. Il est nécessaire pour définir un tel système naturel d'unités de mesure de définir au préalable un système d'unités dans lequel les dites constantes vont être mesurées et auxquelles on va attribuer une dimension. Dire que la longueur unité de Planck est de 10^{-35} m environ signifie qu'au-delà de la relation mathématique conduisant à cette valeur il a fallu choisir un système d'unités de mesure dans lequel la longueur unité est, elle, d'un mètre, lui-même défini par une autre loi de la nature, ainsi qu'un ensemble de dimensions primitives. Nous défendons ici l'idée selon laquelle il n'est pas possible de définir un système naturel absolu d'unités de mesure constitué à partir d'un jeu minimal de constantes.

Nous appartenons au monde, nous en faisons partie au sens stricte du terme, c'est-à-dire que notre être est constitué d'un assemblage de particules appartenant à cet Univers et qu'elles sont en tout point semblables aux autres. Nous ne pouvons-nous extraire de cet Univers afin de le décrire de façon objective et complète.

---

[167] Cohen-Tannoudji G. & Spiro M., 1986 la matière-espace-temps, chapitre 11, Fayard éditions

[168] Barrow J. D., 1991, traduction française 1994, Champs Flammarion

[169] Barrow J. D., ibid, p. 261

Le système de Planck est utilisé par certains domaines de la physique, comme la physique des particules, parce qu'il procure aux physiciens un système d'unités simple, adaptés aux échelles des grandeurs mesurées et qu'il permet également aux théoriciens de proposer des modifications[170] des modèles existants en s'appuyant sur les limites définies par ces unités de Planck.

Les constantes fondamentales et Universelles de la physique se réfèrent toutes à la définition antérieure du mètre, du kilogramme et de la seconde. Ces grandeurs, et leurs valeurs numériques associées, sont un préalable au recensement des constantes et à la mesure de leurs valeurs. Supposons que dans ce choix des trois unités primaires, nous ayons choisis comme unité de longueur le temps de vol d'un photon ou que l'on ait remplacé cette unité de longueur par une unité de volume qui contient de façon implicite le concept de longueur ; les trois unités primaires seraient modifiées et ainsi les dimensions des constantes également (dans les exemples cités elles ne le seraient que faiblement mais des choix différents plus contraignant pourraient être faits).

Ainsi, vouloir définir un système d'unités naturelles absolu est vain ; les choix de constantes pour le constituer vont explicitement reposer sur les trois unités primaires préalablement choisies et mesurées dans un système de dimension lié à ces unités primaires. La recherche d'un système absolu, s'il existait, devrait passer nécessairement par un choix d'unités primaires absolus, ce qui supposerait que les théories physiques puissent décrire la Réalité de façon complète, définitive, ce qui n'est et ne sera manifestement pas le cas.

Les ondes gravitationnelles, qui avaient été prédites par Einstein dans le cadre de sa théorie de la relativité générale, étaient considérées par Einstein comme indétectables car d'amplitudes beaucoup trop faibles. Certains doutaient même de leur réalité et y voyaient une voie possible de falsification de la théorie. En 2014 ces ondes ont été pour la première fois mises en évidence et ont confirmé, une fois de plus, la validité de la théorie de la relativité d'Einstein. Au-delà de cette vérification, cette confirmation de leur existence a permis de montrer qu'au-delà de notre système de perceptions sensorielles, qui constituait jusqu'à maintenant la base des technologies de l'instrumentation scientifique, particulièrement en physique, il existait des phénomènes qui faisaient partie de la Réalité et dont nous n'avions pas conscience. Cette découverte constitue un indice conduisant à la possibilité que notre représentation de la Réalité soit pour le moins incomplète et donc que la recherche de tout système absolu d'unités soit prématurée, voire inutile.

Conclusion provisoire

Dans ce chapitre nous avons montré que l'évolution du système d'unités de mesure, et plus particulièrement les trois unités primaires, avait été fortement influencé par l'évolution parallèle des technologies. Ces dernières étant à la base de tout progrès industriel, et donc commercial, vont imposer aux métrologues le niveau de précision attendu pour chacune de ces unités. Mais cette influence de la technologie ne va pas seulement se faire sentir sur le degré de précision des mesures, mais également sur les définitions qui vont être choisies par l'ensemble des communautés scientifiques, métrologiques et industrielles. Les directions choisies par les recherches industrielles vont à leur tour influer les évolutions des représentations du monde en physique dans la mesure où les résultats empiriques qui seront disponibles sont ceux qui découlent de l'utilisation de ces technologies imaginées par le monde industriel.

Ces précisions accrues vont faciliter la découverte de nouveaux phénomènes qui vont en réaction entrainer de nouvelles réflexions des physiciens vers de nouvelles théories qui vont

[170] Kane G., 2003, Supersymétrie, Le Pommier

bouleverser la physique. Ce sera par exemple le cas, au début du 20ème siècle, avec l'apparition de la relativité et de la mécanique quantique dont la mesure de l'effet photoélectrique, et de l'avance du périhélie de mercure, ont contribué à leur avènement. Mais nous avons également montré que ces évolutions du système international de mesure soulèvent de nombreuses questions aujourd'hui sans réponse. Sans avoir la prétention d'apporter une réponse définitive à ces interrogations, nous allons dans le chapitre suivant tenter d'apporter une contribution aux débats que ces questions soulèvent.

Questions ouvertes dans les nouvelles définitions du SI

Dans ce chapitre, nous allons revenir sur les différentes questions soulevées au cours des chapitres précédents, tant sur les constantes fondamentales et les dimensions primitives que sur les définitions des unités primaires, le mètre, la seconde et le kilogramme et sur les dispositifs choisis pour la mesure de la constante h et l'étalonnage des masses unités. En abordant différemment certaines de ces questions, nous allons tenter, non d'apporter une réponse définitive mais plutôt d'apporter un regard suffisamment éclairer pour mieux cerner les problèmes soulevés et, pour certaines questions, tenter d'apporter des éléments de réponse à partir d'une vision personnelle.

Les unités de mesure ont pour principal objet de quantifier les grandeurs constituant notre Univers, notre réalité perceptible. Ces unités doivent pouvoir être définies par rapport aux théories physiques les plus fondamentales à chaque instant, de façon à atteindre un statut incontestable dans le sens où les résultats des mesures réalisées à l'aide d'un jeu d'unités choisis doit conduire à des valeurs numériques indépendantes du lieu et de l'instant où elles sont réalisées. Elles doivent donc constituer des invariants dans un espace de Riemann, base de la relativité générale, mais aussi dans l'espace des configurations dans lequel la physique quantique est définie.

Dans notre monde moderne, et depuis le 17ème siècle, toutes les théories physiques élaborées afin d'expliquer les phénomènes observés reposent sur des modèles mathématiques dont l'objectif est, d'une part de relier logiquement les observations faites à partir des différents phénomènes observés, et d'autre part permettre la prédiction quantitative et qualitative de résultats empiriques non encore connus ; ces prévisions vont permettre soit de confirmer les théories soutenues, soit de les infirmer, totalement ou partiellement, en les falsifiant à l'occasion de ces prédictions. Il n'est plus possible dans la physique moderne de soutenir une nouvelle théorie explicative sans l'adosser à un modèle mathématique adapté. C'est de l'usage de ces modèles mathématiques que sont apparues les constantes fondamentales, conséquences du formalisme choisi.

Nous avons expliqué que dans le cadre de la théorie de Newton, le modèle géométrique qu'il avait adopté dans les Principia, la comparaison de rapports de grandeurs de même type, ne permettait pas l'apparition de la constante de gravitation G qui n'apparaîtra que bien plus tard dans les modélisations algébriques, celles de Lagrange ou celles de Hamilton. Le formalisme mathématique est un élément fondamental lié à l'existence des constantes fondamentales. C'est par cette question de l'incidence des théories mathématiques sur notre compréhension de l'Univers, et en particulier sur l'apparition des constantes fondamentales, que nous allons commencer notre analyse.

Le paradigme des théories physiques

En 1970, Masterman[171] estimait à vingt et un le sens du terme paradigme dans la première édition de l'ouvrage de Kuhn, « la structure des révolutions scientifiques ». Kuhn reconnut par

[171] Masterman Margaret, 1970, The Nature of a Paradigm, dans I. Lakatos et A. Musgrave (eds), Criticism and the Growth of Knowledge, Cambridge, Cambridge University Press, p. 58 - 59

la suite qu'il avait voulu donner deux sens à ce terme, mais un seul représentait pour lui une définition correcte : Il appelle matrice disciplinaire ce qui correspond à l'ensemble des croyances, des valeurs reconnues et des techniques qui sont communes aux membres d'une même communauté scientifique. En 1976, Malherbe[172] va proposer une définition précisant que lorsqu'un ensemble de théories constituant un paradigme va constituer l'unique référence des étudiants en physique, ce qui va dans une certaine mesure limiter et diriger les recherches de théories plus fondamentales :

« L'ensemble des solutions concrètes appartenant à une certaine matrice. Un paradigme au sens strict représente ainsi l'ensemble des exemples ou solutions d'énigmes auxquels se réfèrent les membres d'une même discipline en période de science normale et que l'on retrouve alors systématiquement dans les manuels de science. Ces exemples fonctionnent comme des modèles de travail scientifique, que les étudiants devront s'efforcer de suivre afin d'acquérir la maitrise de leur discipline. »[173]

La mécanique quantique constitue un des principaux paradigmes, la seule interprétation qui est enseigné aux étudiants jusqu'à un cursus de Master étant celle dite standard de l'école de Copenhague, l'interprétation historique de la mécanique quantique dont les postulats ont été posés notamment par Bohr, Heisenberg et Dirac.

Ainsi, si la mécanique quantique interprétée selon le modèle standard, celui de l'école de Copenhague, et la relativité générale conçue par Einstein, constituent actuellement un paradigme incontestable pour les physiciens, les concepts d'unités, de dimensions et de grandeurs ne peuvent être compris qu'à l'aulne de cet ensemble restreint de théories et de leur interprétation. Quelles en sont les conséquences pour le système de mesure ? La relativité impose l'acceptation d'un univers quadridimensionnel et une continuité de l'ensemble des grandeurs, quand la mécanique quantique repose sur conception probabiliste de toute mesure et du concept de superposition des états en l'absence de toute mesure. L'incompatibilité fondamentale entre ces deux théories constituant le paradigme physique a probablement contribué au choix des physiciens des constantes fondamentales comme unique solution pour définir les sept unités de mesures du système international. Mais, comme nous l'avons exposé dans le chapitre 2, plusieurs théories ayant comme objectif principal la synthèse de ces deux théories sont actuellement développées : la gravitation quantique à boucle et la théorie des cordes ; en marge de ces deux théories, plusieurs interprétations sont étudiées, d'abord pour redéfinir l'interprétation de la mécanique quantique, par exemple, l'interprétation de De Broglie – Bohm[174], celle des mondes multiples due à Everett[175] ou celle dite du solipsisme convivial[176], puis avec l'introduction de dimensions spatiales supplémentaires dans la mécanique relativiste, notamment l'hypothèse d'un espace-temps penta dimensionnel[177]. La formulation d'une théorie plus générale regroupant mécanique quantique et relativité, ou introduisant une nouvelle compréhension de la mécanique quantique et de la relativité conduira à une nouvelle représentation de notre réalité pouvant remettre en cause le choix des constantes fondamentales en tant que fondement des unités du SI.

---

[172] Malherbe J. F., 1976, La philosophie de Karl Popper et le positivisme logique, Namur, Presses Universitaires de Namur, coll. « Philosophie et Lettres », 2ème éd. Revue et corrigée, Presses Universitaires de Namur et PUF, 1979

[173] Nadeau R., 1999, Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie, Presses Universitaires de France, Paris, pp. 463 - 464

[174] Bohm D., 1989, Quantum Theory, Dover Publications, New-York

[175] Laloë F., 2017, Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?, CNRS Éditions / EDP Sciences 2ème édition

[176] Espagnat B. et Zwirn H., 2016, measurement problem : Decoherence and convivial solipsism, Foundations of Physics, vol. 46, pp. 635 - 667

[177] Wesson P. S., 1999, *Space-Time-Matter, Modern Kaluza-Klein Theory*, World scientific publishing, Singapore

Lien entre modèle mathématique, unités de mesure et nature des constantes fondamentales

Pourquoi s'interroger sur le rôle des théories mathématiques dans les théories physiques ? Une partie de la réponse se trouve dans le lien qui existe entre l'apparition des constantes fondamentales, que les métrologues ont choisi pour servir de fondement aux définitions des unités du SI, et le choix du formalisme mathématique pour modéliser telle ou telle théorie physique qui permette de donner une explication du monde où nous vivons, de ce que nous appelons notre réalité.

Les théories physiques énoncées successivement au cours de l'histoire sont le reflet des progrès dans notre compréhension du monde qui nous entoure, ou du moins des éléments perceptibles directement ou indirectement par nos sens. De ce point de vue, les théories physiques ont un double aspect :

Contingentes, car l'énoncé d'une théorie physique est le reflet de ce que nous pensons être vrai dans notre représentation de l'Univers à un instant donné,

Nécessaires, car induites par l'observation de ce monde qui nous impose ses lois que nous cherchons à découvrir et comprendre.

La question fondamentale sous-jacente à ce double aspect peut se formuler de la façon suivante : pour une théorie physique donnée, c'est-à-dire une théorie visant à fournir une explication d'un ensemble cohérent de phénomènes observés, et le choix d'un modèle mathématique permettant de quantifier les grandeurs déjà observées ou celles prédites, le choix de l'utilisation d'une théorie mathématique, et d'un formalisme particulier, vont-ils conditionner l'existence et la nature des constantes fondamentales, où bien l'apparition de telle ou telle constante est-elle indépendante du choix de l'outil mathématique et de son formalisme ?

Un modèle mathématique permet aux physiciens de classer les phénomènes observés, de les quantifier, et de comprendre les liens des grandeurs s'y rapportant avec les autres éléments du réel. Plusieurs théories mathématiques peuvent permettre d'atteindre ce but.

Un exemple est la mécanique newtonienne. Elle est adossée à l'algèbre permettant de traduire l'action à distance entre deux objets de masse M_1 et M_2 séparés d'une distance d par la relation :

$$F_{12} = G\frac{M_1 M_2}{d^2}$$

De cette relation, la théorie physique va conclure que l'action à distance constituant le phénomène de gravitation est en fait une force réciproque F_{12}. Cette conclusion, nous la jugeons aujourd'hui comme erronée car nous avons remplacé cette théorie de la mécanique newtonienne par celle d'Einstein selon laquelle il n'existe aucune force d'action réciproque sur chacun des deux objets matériels, mais que cette action est le résultat d'une optimisation de l'énergie potentiel des deux objets qui vont suivre les courbes des géodésiques de l'espace-temps. Nous apportons la même certitude à cette théorie que celles qu'accordaient les contemporains de Newton et les physiciens du 19ème siècle à la force de gravitation. Le phénomène est le même mais la théorie mathématique utilisée a été choisie de façon à s'adapter à l'interprétation de la gravitation qu'imaginait Einstein. Les modèles mathématiques ne sont que la traduction d'une hypothèse avancée par un physicien à un instant donné, le reflet d'un schéma mental de représentation, de compréhension.

Il faut donc se garder de vouloir utiliser telle théorie mathématique supportant telle théorie physique au-delà des limites que les hypothèses avancées dans cette théorie physique imposent d'elles-mêmes. Le modèle standard, branche de la mécanique quantique qui décrit les caractéristiques et le comportement des particules est en accord jusqu'à maintenant avec l'ensemble des résultats empiriques. Certains physiciens ont poussé ce modèle des particules en généralisant la propriété de symétrie qui s'y trouve en prédisant avec ce modèle

supersymétrique l'existence de particules étranges, les WIMPS qui seraient selon eux aptes à expliquer la nature de la matière noire. Jusqu'à présent ces particules n'ont pas été observées et l'on peut se demander si l'utilisation du modèle mathématique adossé au modèle standard n'a pas été poussée au-delà de ces limites conceptuelles. La question reste ouverte à ce jour.

Enfin, le passage d'un modèle mathématique à un autre comme ce fut le cas entre la mécanique de Newton et celle d'Einstein peut modifier l'expression des constantes fondamentales liées fondamentalement à ces phénomènes physiques. La constante G dans la théorie de Newton, devient prend pour expression en relativité générale : $G' = \frac{8\pi G}{c^4}$.

Le choix du modèle mathématiques fait dans le cadre d'une théorie physique doit d'une part à minima préciser les limites de son utilisation, et d'autre part être remis en question si une ou plusieurs constantes qui apparaissent naturellement dans les relations mathématiques ne présentent pas des dimensions représentatives de grandeurs existantes dans notre réalité.

Au début de la mécanique quantique, Heisenberg avait proposé l'utilisation de la théorie des matrices dans cette théorie, une branche de l'algèbre, pour modéliser les phénomènes connus à l'époque. Finalement c'est un autre formalisme algébrique, reposant sur le concept d'opérateurs, qui a été adopté par la communauté scientifique car ce dernier était d'une utilisation plus simple et permettait une meilleure compréhension des prédictions théoriques et de leurs interprétations dans le cadre de notre représentation globale de l'univers. La base de ce modèle mathématique de la mécanique quantique est le postulat de l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 \Psi(t)}{\partial r^2} + V\Psi(t)$$

Où $\Psi(t)$ représente la fonction d'onde décrivant les différentes caractéristiques de l'objet étudié, m sa masse et V le potentiel dans lequel il se trouve. La fonction d'onde a été initialement comprise par de Broglie comme l'onde associée au déplacement de tout corps matériel pour vu d'une masse non nulle. Mais cette explication soulevant de trop nombreuses difficultés, notamment celle de la nature de cette onde, Born a proposé de la comprendre comme une onde de probabilité, une fonction décrivant totalement un objet matériel en fonction de sa position sur l'espace-temps.

Étrangement aucune nouvelle constante fondamentale n'est apparue avec ce formalisme mathématique ; la constante de Planck h était déjà présente dans l'hypothèse de Planck de relier l'énergie E d'une onde électromagnétique à sa fréquence f :

$$E = hf$$

Pourquoi cette absence d'apparition d'une nouvelle constante ? Simplement parce que malgré ce formalisme très spécifique des opérateurs, la théorie mathématique utilisée est l'algèbre classique et ne diffère donc pas des théories classiques utilisant déjà ces mathématiques dans lesquelles étaient déjà apparues, de façon nécessaire, plusieurs constantes : c la vitesse de la lumière, e la charge électrique élémentaire dans les équations de Maxwell notamment, G la constante de gravitation dans la mécanique newtonienne et k la constante de Boltzmann dans la théorie de la physique statistique qui utilise également l'algèbre. En aurait-il été autrement si la suggestion d'Heisenberg d'utiliser la théorie des matrices avait finalement été choisie ? Non car cette théorie n'est qu'un formalisme différent de cette même théorie algébrique.

La théorie de la relativité, proposée par Einstein utilise, elle, la théorie des tenseurs qui est dérivée de la théorie algébrique qu'elle utilise. De cette théorie de la relativité, dans sa description de la gravitation, découle l'apparition de plusieurs constantes : c, la célérité de la lumière dans le vide et une constante de gravitation G' modifiée par rapport à G la constante de gravitation de Newton. Elle apparaît comme composite de cette constante ($G' = \frac{8\pi G}{c^4}$). L'avantage de cette forme modifiée de la constante de gravitation est que sous cette forme elle présente une dimension de l'inverse d'une surface alors que, comme nous l'avons vu, la

constante G a une dimension qui ne correspond à aucun objet connu, à aucune grandeur de notre réalité.

De cet exemple il découle que selon la maturité de la théorie physique utilisée, la forme sous laquelle va apparaître telle ou telle constante fondamentale associée pourra être différente ; ici, la gravitation de Newton fait apparaître la constante de gravitation G, alors que dans le cadre de la théorie, plus générale de la relativité d'Einstein la constante G' qui apparaît, bien que restant une fonction linéaire de G présente une variation dans sa valeur et surtout dans sa dimension : $G' = \frac{8\pi G}{c^4}$.

Il semble donc que ce n'est pas le choix d'une théorie mathématique particulière qui soit la cause d'une variation dans l'apparition des constantes, mais plutôt le degré de généralité de la théorie physique considérée. Une théorie physique va décrire les liens qui existent entre certaines grandeurs indépendamment de tout modèle mathématique associé ; il est donc logique de conclure que les constantes qui vont apparaître seront les mêmes. Ce qui n'est pas certain, en revanche, c'est que toutes les constantes en rapport avec une même théorie physique apparaissent nécessairement dans les différents formalismes mathématiques possibles.

« La tache de la contemplation de la nature est d'examiner la substance du ciel et des astres, la puissance et la qualité de la génération et de la corruption, et, par Zeus !, elle est capable de mener des démonstrations au sujet de la grandeur, de la forme et de l'ordre des choses. Quant 'à l'astronomie elle n'entreprend de parler de rien de tel, mais elle démontre l'ordre des choses célestes, ayant déclaré que le ciel est véritablement un cosmos ; elle parle des formes, des grandeurs, des distances de la Terre par rapport au Soleil et à la Lune, des éclipses, des conjonctions des astres, sur la quantité et la qualité qui se manifestent dans leur révolutions »[178]

En 1909, Lucien Poincaré[179] écrivait dans son introduction à « la physique moderne » :

« *Le lecteur n'aura pas besoin pour comprendre le texte d'avoir recours à un traité de physique (…) j'ai évité d'user du langage mathématique : l'algèbre est une langue admirable, mais il est souvent possible de ne s'en servir qu'avec beaucoup de discrétion*. »

Cette mise en garde est prémonitoire de la part dominante des mathématiques dans les théories physiques de ce début du 21ème siècle. Ce rôle, excessif selon nous, des mathématiques va conduire, par exemple, à occulter des questions ouvertes fondamentales, dont la formulation d'une réponse possible serait utile au progrès de notre connaissance, comme par exemple, la nature de la matière et de sa caractéristique principale la masse, la nature de la charge électrique et sa manière de communiquer à distance dans l'espace-temps et d'échanger de l'énergie sous une forme appelée électromagnétique, la nature de cet espace-temps qui se déforme pour générer des ondes gravitationnelles porteuse d'énergie, alors que selon la mécanique relativiste, pour satisfaire aux transformations de Lorentz, cet espace-temps doit être sans structure, et d'énergie nulle.

Nous avons également montré dans le chapitre 2 qu'il existait une forte interdépendance entre, d'une part le formalisme mathématique utilisé, et d'autre part le choix contingent des dimensions primitives ainsi que des unités qui les utiliseront et seront utilisées par ce formalisme. Nous avons vu qu'en changeant certaines unités, il était possible de masquer une ou plusieurs constantes dans certaines relations mathématiques, mais qu'en aucune façon il n'était possible de les faire disparaitre sauf à accepter une perte significative d'informations. Ainsi il semble que nous puissions soutenir l'idée que l'existence des constantes est non seulement indépendante du formalisme mathématique choisi mais aussi du système d'unités et de dimensions primitives choisis, même s'il est possible de masquer certaines constantes par une manipulation des unités de référence et du formalisme mathématique utilisé.

[178] Posidonios, cité par Klein E., Brax P. et Vanhove P., qu'est-ce que la gravité ? Le grand défi de la physique, Dunod, 2019 p. 10

[179] Poincaré L., 1909, La Physique Moderne, Paris Ernest Flammarion Éditeur, p. 2

Sur l'existence d'une loi ultime décrivant tous les phénomènes de l'Univers et supprimant toutes constantes fondamentales

Les physiciens et métrologues ont choisi les constantes fondamentales pour définir les unités du SI en partie parce que celles-ci apparaissent dans les lois fondamentales de la physique et semblent irréductibles. Ici nous devons utiliser le sens fort du terme loi, c'est-à-dire un énoncé qui doit vérifier simultanément plusieurs propriétés. Si nous regardons la définition du terme de lois en sciences de la nature dans un dictionnaire philosophique[180], on trouve sous le terme loi de la nature :

« Loi empirique ou descriptive vraie en vertu d'une nécessité physique et qui, en ce sens, ne tolère aucune exception (…) Une loi est un énoncé universel caractérisé par un champ d'application qui n'est limité ni dans le temps ni dans l'espace ».

Le concept de loi, selon cette définition, peut se résumer sous la forme de trois conditions nécessaires que devra remplir un énoncé pour obtenir ce statut :

Être un énoncé universel empiriquement vrai

Être un énoncé de portée illimitée

Être un énoncé qui entraîne comme conséquence et justifie des énoncés contrefactuels

Ces trois conditions doivent être simultanées : la première traduit la nature empirique des données dont on cherche la traduction en lois, la seconde énonce la validité de cette loi en tous points de l'espace et à tous les instants, autrement dit la loi doit être indépendante du lieu et de l'instant d'application. La dernière de ces conditions peut être comprise comme le fait qu'une loi exprime une relation nécessaire entre des propriétés. Il nous faut ajouter à ces trois critères qu'une loi peut présenter des exceptions sans remettre en cause sa généralité car les lois ne sont définies que dans le cadre de conditions initiales précises nécessaires à la résolution d'un problème ; Les lois sont ceteris paribus. En physique, la détermination de la trajectoire d'une balle lancée horizontalement demande la connaissance exacte de la vitesse initiale ainsi que des caractéristiques gravitationnelles environnantes et des caractéristiques du gaz dans laquelle elle se déplace.

Une loi doit être universelle et empiriquement vérifiée. Elle est la traduction en énoncé général de régularités observées empiriquement, mais ne découle pas d'un processus uniquement inductif. Toute connaissance scientifique repose, au début de l'analyse, sur l'observation de régularités traduites ensuite, par une généralisation, en lois qui sont soit des principes, soit des propositions démontrables au sein d'un ensemble théorique. La condition de l'empirisme doit être satisfaite aussi bien par les lois relevant, par exemple, des sciences physiques que celles relatives aux sciences du vivant. L'universalité d'un énoncé se trouvera d'autant plus limité par de nombreuses exceptions induites par une complexité, ou une compréhension partielle qui va restreindre son champ d'application. Se pose alors la question de la limite d'acceptabilité de ces exceptions.

La seconde condition porte sur la validité d'une loi en tous lieux et en tout temps. Elle exprime en premier le fait que tous les lieux de l'univers doivent être semblables, ce qui se traduit, en physique, par les conditions d'isotropie et d'homogénéité qui restent en physique des questions en partie ouvertes. Selon la relativité, une loi s'exprime de la même façon et reste valable avec les mêmes conditions initiales dans tous référentiels inertiels, c'est-à-dire des repères différenciés les uns des autres par un déplacement avec une vitesse uniforme. La loi de gravitation de Newton, approximation pour des vitesses faibles de la loi de gravitation relativiste, reste valable en tous points de l'espace. Elle s'appliquera aussi bien aux planètes de notre système solaire qu'aux planètes tournant autour d'une étoile dans une autre galaxie. Mais comme nous l'avons dit, une loi n'est définie qu'avec un ensemble de conditions initiales qui

[180] Nadeau R., 1999, vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie, éditions PUF Paris, p. 380

lui sont attachées. La validité temporelle pose un problème plus important. Considérons, en physique, les lois définissant les interactions entre particules élémentaires, elles sont au nombre de trois : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible décrivant et expliquant les phénomènes de radioactivité et l'interaction forte responsable d'une part des liaisons entre les particules élémentaires dans les particules composites comme le neutron ou le proton, et d'autre part de la cohésion des noyaux atomiques. Le modèle cosmologique standard nous explique que ces trois interactions ne sont séparées et n'ont les propriétés observées que depuis un certain temps. Peu après le Big-Bang initial, ces trois interactions se sont séparées progressivement et ont vu leurs propriétés évoluer vers celles que nous constatons aujourd'hui. Ainsi dans le domaine de la physique ce que l'on nomme lois n'est pas intemporelle ; par exemple la désintégration du méson K qui, à contrario des autres particules, violent la parité temporelle, phénomène appelé brisure de symétrie constitue une exception fondamentale à la loi générale. Ainsi, dans les sciences fondamentales, comme la physique, ce que nous pouvions à un instant donné qualifier de lois se révèlent ne pas en être.

La dernière condition définit une relation causale entre les conditions initiales et l'effet observé et expliqué par la loi. L'existence d'énoncés contre factuels implique, selon Lewis[181], que la cause est toujours antérieure à l'effet. Cette considération entraine naturellement que l'effet ne saurait expliquer la cause.

Que changerait le choix des constantes si les lois qui nécessitent leur expression perdent leur statut de lois pour n'être plus qualifiable que de modèle avec une validité limité dans le temps et/ou l'espace ? Si les théories physiques les plus fondamentales, la relativité d'Einstein, la mécanique quantique et la physique statistique ne sont plus que de simples modèles dont la validité est liée à un volume limité de l'espace-temps, alors on peut être amené à se poser la question du caractère fondamental de ces constantes et donc de leur utilisation dans les définitions des unités de mesure.

Ces questions que nous venons de soulever à propos du qualificatif de lois en physique nous conduisent à formuler deux éléments de réflexion que nous allons devoir prendre en compte :

La définition d'une loi et sa possible application à nos descriptions des phénomènes de la nature,

L'existence de lois ultimes qui prendrait en compte la totalité des éléments de la Réalité.

Ce sont ces deux points que nous allons maintenant discuter en essayant d'apporter une réponse à deux questions :

Pouvons-nous qualifier de lois les théories physiques actuellement reconnue par la communauté scientifique,

Existe-t-il des lois ultimes en physique et sont-elles accessibles à la compréhension de l'homme ?

Existe-t-il réellement des lois en physique ?

En 1954 Wolfgang Pauli, l'un des pères de la théorie quantique, écrivait à propos de la naissance de nouvelles théories physiques :

« *Les théories naissent d'une compréhension inspirée par le matériel empirique, compréhension que l'on peut interpréter au mieux, en se référant à Platon, comme la correspondance qui s'établit entre les images intérieures et des objets extérieurs et leur comportement.* »[182]

Il exprimait ainsi l'idée que, selon lui, les limites de notre pouvoir explicatif sont déterminées par notre incapacité fondamentale à observer convenablement les phénomènes naturels et par incapacité à établir les analogies satisfaisantes. Pauli soutenait l'idée que le travail du physicien

[181] Lewis D., philosophical papers, Vol. 2, Oxford university press (1986), p 33 - 66

[182] Pauli W., 1999, Physique Moderne et Philosophie, Albin Michel, p. 152

ne se contentait pas à décrire le monde mais l'expliquait réellement selon sa perception et avec les mots de son langage, celui des mathématiques.

Wittgenstein soutenait, lui, que :

« *À l'origine de notre conception moderne du monde se trouve l'illusion que les soi-disant lois de la nature expliquent les phénomènes naturels.* »

Pourtant le sens commun nous pousserait à penser que si l'on connait la cause d'un fait empirique, alors nous sommes capables de l'expliquer. C'est à cette question que va tenter de répondre Russell[183] en 1913. Il défend le point de vue selon lequel « *le mot cause est si intimement lié à des associations trompeuses qu'il serait souhaitable de l'exclure définitivement du vocabulaire philosophique* ». Cette position va pousser Wittgenstein à adopter la solution téléologique pour distinguer entre description et explication. Pour un philosophe moderne comme Carl Hempel[184], il faut rechercher *« ce que font les scientifiques lorsqu'ils expliquent quelque chose* ». Cette position rejoint celle d'un physicien comme Steven Weinberg qui écrit en 2002 :

« *Au lieu de répondre que les scientifiques se trompent lorsqu'ils déclarent, ce qu'ils font souvent, que leur travail consiste à expliquer les choses, les philosophes qui s'intéressent au sens du terme « explication » en sciences devraient plutôt s'efforcer de comprendre ce que font les scientifiques lorsqu'ils expliquent quelque chose.* »[185]

La formulation d'une loi de la nature, à partir de l'observation d'un ensemble de phénomènes, suit le plus souvent une même séquence temporelle : des régularités sont observées, puis à partir de celles-ci, et de leurs classifications, on essaye d'en déduire, à partir d'un raisonnement abstrait et souvent intuitif, des règles générales permettant de prédire, pour certains types de systèmes et lorsque certaines conditions initiales sont réalisées, l'occurrence d'événements spécifiques qui en sont les effets. Mais le degré de généralisation dépend de la compréhension profonde des phénomènes observés, de leurs représentations à l'aide de schémas mentaux.

Pour aider les philosophes à cette compréhension du travail des scientifiques visant à formuler les lois de la nature et donc à expliquer notre monde, Hempel soutient que :

« *L'explication d'une régularité générale consiste à la subsumer sous une régularité plus vaste, sous une loi plus générale*. »[186]

Par exemple si l'on observe la chute d'un corps, le nombre de paramètres à prendre en compte semble au premier abord important. Pour en simplifier la compréhension, on commencera par négliger les forces de frottements de l'air en ne considérant que des corps ayant une certaine densité minimale, puis à partir des observations ainsi réalisées on pourra en déduire les relations de la mécanique classique découvertes par Newton. Les scientifiques ont estimé que ce comportement était suffisamment général et Universel, spatialement et temporellement illimité pour décrire, par exemple, le mouvement des corps célestes. Ils ont attribué à la force de gravitation de Newton le statut de loi ne voyant aucune contradiction avec les conditions de généralité et de portée illimitée. Cette loi de la gravité de Newton s'est ensuite transformée en celle de la gravitation de la relativité générale d'Einstein qui lui donne sa généralité actuelle et fait perdre à l'énoncé de Newton son caractère général, donc son statut de loi en ne lui concédant que celui de modèle de portée limitée.

Avec la prise en compte de tous les paramètres environnementaux, les régularités seront moins nombreuses et pourront même disparaître au-delà d'un certain degré de complexité. Il semble ainsi que l'existence de lois est intimement liée au degré de maturité d'une science, lui-même dépendant de la complexité de celle-ci. Plus une science est complexe, moins il sera

[183] Russell B., 1912 - 1913, « On the notion of cause », Proceedings of the Aristotelician Society, vol. 15
[184] Hempel C. et Oppenheim P., 1948, Philosophy of Science, vol. 15, n°155, p. 135
[185] Weinberge S., 2002, La physique peut-elle tout expliquer, Journal La Recherche, n°349, pp. 25 - 31
[186] Hemple C., ibid

facile de définir des généralisations applicables au plus grand nombre de systèmes, et moins nous pourrons énoncer de lois. En biologie, il n'est possible de formuler que des modèles. Si à un instant donné une science pouvait être considérée comme aboutie, alors des lois pourraient être établies pour cette science.

Souvent, le nombre de paramètres à prendre en compte et la complexité des relations entre les différentes parties d'un système est telle que l'on est obligé d'avoir recours à des analogies de systèmes différents et plus simples. Les régularités ainsi mises en évidence ne sont que l'image d'un système très simplifié dans lequel on a été contraint de négliger nombre de paramètres jugés secondaires. On parlera alors de modèles et même l'on se contentera souvent de décrire la fonction de tel ou tel partie d'un système complexe dans un environnement spécifique.

Maturité et complexité dans une science sont liées à la difficulté de décrire et comprendre correctement les phénomènes. Nous pouvons, nous semble-t-il, avancer que s'il existe des lois qui nous sont accessibles, elles doivent être plus probables dans les domaines de la connaissance qui se caractérisent par l'étude de systèmes assez simples pour permettre aux scientifiques d'atteindre rapidement un degré de généralité, de maturité suffisante.

Nous soutenons ici la thèse qu'il n'existe pas de lois, au sens où une loi doit être générale et de portée illimitée tant spatialement que temporellement, car la condition de temporalité illimitée ne peut pas être satisfaite a priori et celle relative à la spatialité reste encore ouverte en attente de confirmations en fonction des progrès dans le domaine de l'astrophysique. Mais si nous restreignons à la fois cette condition temporelle à une période de temps raisonnable et finie et la condition spatiale à un domaine proche, alors il est possible de trouver des exemples de lois.

D'une certaine manière, un modèle est une loi qui s'affranchirait des données responsables de certains écarts dans les régularités étudiées. Une des difficultés pour un modèle réside dans le choix de l'analogie : elle doit être acceptable dans le sens où elle doit se comporter presque comme l'objet étudié ; et c'est dans ce « presque » que résident les approximations qui vont permettre de simplifier l'étude de l'objet et ainsi la mise en évidence de régularités, de corrélations entre tels ou tels paramètres sur lesquels le scientifique souhaite agir. Un modèle peut permettre dans certains cas l'établissement de relations mathématiques, de portée limitée, des quasi lois, qui vont autoriser des vérifications et des prédictions de résultats expérimentaux, mais toujours dans le cadre limité de validité du modèle, de ses conditions initiales et environnementales, et en acceptant une marge d'erreur, donc un certain flou dans la description des régularités fixé par le choix de l'analogie utilisée.

Le statut de lois suppose, lui, d'une part le degré de généralisation le plus élevé, et la réalisation de plusieurs conditions nécessaires qui vont permettre la traduction de ces lois sous la forme d'énoncés mathématiques.

La réalisation de conditions initiales n'est pas suffisante pour entraîner l'applicabilité d'une loi, mais elle est nécessaire à sa validité.

Dans l'absolu peut-on encore parlé de lois puisque les conditions nécessaires ne pourront jamais toutes être satisfaites. Ne devrait-on pas plutôt utiliser le terme de modèles qui autorise plus d'exceptions, ne doit pas être nécessairement de portée temporelle et spatiale illimitée, et repose sur la recherche d'analogies pouvant permettre l'élaboration de structures mathématiques explicatives et prédictives.

Si l'on se réfère à l'histoire des sciences, celle des sciences physiques, pendant très longtemps ce que l'on a cru être des lois n'étaient en fait que des modèles approximatifs, des analogies décrivant de manières partielles les phénomènes observés. On pense aujourd'hui que nos connaissances ont atteint un tel niveau de maturité que le statut de loi est uniquement lié à l'établissement de relations mathématiques capables de décrire et prédire l'ensemble des phénomènes physiques connus. Mais nous venons de montrer qu'il est objectivement

impossible d'affirmer que ce que nous qualifions de lois aujourd'hui a une portée illimitée temporelle et que la validité spatiale reste encore largement à confirmer.

La définition d'une loi repose sur des conditions trop strictes pour qu'elle puisse être utilisée dans une quelconque des lois des sciences de la nature. Le caractère illimité, tant temporel que spatial en est la principale cause. Depuis les découvertes en physique des particules confirmant que les relations liant les objets élémentaires, que sont les particules, ont évoluées et pourraient encore le faire dans le futur, le critère de validité quel que soit l'instant est irréaliste. En physique on ne peut parler de lois fondamentales mais seulement de lois provisoires et approximatives, dont la portée n'est pas temporellement illimitée. Ce doute dans l'existence de lois absolues en physique, et plus généralement dans les sciences de la nature, ne permet pas de conclure au caractère non fondamental des constantes utilisées, mais simplement d'émettre un doute sur leur caractère Universelle et intemporel, ce qui autorise leur utilisation mais en étant conscient de cette limitation.

La question qui découle logiquement de cette analyse est la possibilité de l'existence de lois ultimes en physique et de la capacité de l'homme à les comprendre et les énoncer dans un futur indéterminé.

Pourrons-nous un jour écrire un ensemble de lois du tout permettant la définition d'un système d'unités absolues ?

Si un ensemble de telles lois existent et constituent un but atteignable par l'homme, alors il sera possible de définir un système d'unités absolues qui ne pourra plus évoluer. Une telle perspective nous semble-t-elle réaliste ? Il semble que les scientifiques soient partagés sur ce point. Pour certains [187] l'homme a atteint un degré de maturité suffisant pour qu'il soit envisageable d'atteindre cette ultime connaissance, pour d'autres[188], l'homme faisant partie du système global Univers, il n'est pas possible d'énoncer une loi ultime car cette connaissance nécessitera de s'abstraire de notre Univers, de le contempler de l'extérieur :

« *La certitude de nos explications est aussi limitée, je ne pense pas que nous soyons jamais certains d'aucune d'entre elles. Tout comme il existe des théorèmes mathématiques profonds qui nous montrent l'impossibilité de prouver la cohérence de l'arithmétique, il semble probable que nous ne serons jamais capables de prouver que les lois de la nature les plus fondamentales sont cohérentes d'un point de vue mathématique. (…) Finalement il parait évident que nous ne pourrons jamais expliquer les principes scientifiques les plus fondamentaux. C'est sans doute pour cette raison que certains affirment que la science n'apporte aucune explication.* »[189]

Énoncer les lois ultimes de la physique, que certains pensent pouvoir formuler en une seule loi dite « du tout », reviendrait à faire disparaître les constantes fondamentales, toutes les constantes dans leur forme Universelle en les rendant calculables par ces Théories Ultimes ; une telle possibilité fournirait la possibilité de mesurer tout ce qui existe dans le ou les Univers[190] et donc de mesurer toutes les grandeurs y compris celles dont nous n'avons pas encore connaissance à partir d'un système d'unités absolues.

Sommes-nous proches de cette connaissance ultime et pourrons-nous l'atteindre ? L'existence d'une limite signifierait que l'organisation de la Réalité est compréhensible dans un cadre fini. Nous ne pouvons même pas affirmer qu'un système d'unités serait encore nécessaire pour la compréhension de ces lois ultimes.

---

[187] Kane G., Supersymétrie, 2000, Les lois ultimes de la nature dévoilées, Le Pommier

[188] Levy-Leblond J. M., 2002, Le monde est plus riche et compliqué que ne le pensent les physiciens, Journal La Recherche, n°349, pp. 87 - 89

[189] Weinberg S., 1997, Le rève d'une théorie ultime, Odile Jacob, cité dans La Recherche n°349, janvier 2002, pp. 30 - 31

[190] L'hypothèse du multivers postule que notre Univers fait partie d'un ensemble a priori infini d'autres Univers dans lesquels les constantes prendraient toutes les valeurs possibles, conduisant ainsi à des Univers de nature très différentes.

La physique moderne s'appuie sur un petit nombre de théories dont nous avons déjà parlé : la mécanique relativiste, la mécanique quantique et la physique statistique. Formuler « l'équation du tout » suppose qu'au préalable l'ensemble de ces lois soit regroupées au sein d'une seule, plus générale, qui permettrait d'expliquer tout phénomène connu ou encore inconnu. Or, comment être certain de pouvoir expliquer quelque chose que nous ignorons encore, dont nous n'avons aujourd'hui aucune idée ? Une telle proposition nous semble logiquement impossible.

Alors pourquoi cette idée chez certains physiciens l'écriture d'une ou de plusieurs lois physiques ultimes persiste ? Selon nous la principale raison doit être cherchée dans la prédominance des énoncés mathématiques sur ceux de lois physiques. Comme nous l'avons déjà dit plus haut, les théories mathématiques se sont révélées des outils puissants pour expliquer les valeurs numériques des quantités observées et prédire avec une précision extrême celles des grandeurs qui seront mesurées. Là où il devenait difficile de formuler des mots pour décrire notre réalité, les mathématiques ont apporté un langage universel, n'ayant qu'une unique interprétation, ne permettant pas de comprendre tous les concepts ni la nature de certaines grandeurs, mais permettant de calculer la valeur des grandeurs observées et de celles qui vont être la conséquence logique de ces modèles mathématiques. Einstein faisait partie de ceux qui pensaient que la physique doit primer sur la théorie mathématique qui la supporte. En 1927, lors du Congrès Solvay il dira à Lemaître qui lui expliquait sa théorie d'un Univers en expansion :

« *Vos calculs sont corrects, mais votre physique est abominable* ».

Le modèle mathématique choisi pour une théorie physique donné l'est d'une part pour atteindre un degré de simplicité suffisant pour faciliter les évolutions théoriques et prédictions d'effets éventuellement falsifiables, mais aussi pour justifier l'interprétation des phénomènes physiques que le physicien estime comme vraie. Prenons un exemple, celui de la matière noire dont la nature reste encore une question ouverte. L'hypothèse de l'existence de cette matière repose en premier sur l'observation d'une rotation des galaxies impossibles à expliquer selon les lois de la mécanique classique ou relativiste sans la supposition de l'existence d'une matière inconnue et non observable par les moyens classiques de l'astronomie qui assure la cohésion de ces structures lors de la rotation ; deux positions s'affrontent, sur ce sujet de la matière noire, selon les physiciens auxquels on s'adresse :

Ces observations sont la preuve que la théorie relativiste de la gravitation doit être « corrigée », pour ceux qui ne croient pas en l'existence d'une substance matérielle invisible qui a échappé à toute détections jusqu'à maintenant,

Ces observations sont la confirmation de la validité de la mécanique quantique, théorie mathématique symétrique impliquant l'existence de particules, dites « super symétriques », non encore observées mais découlant du modèle standard décrivant le monde des particules.

À chacune des interprétations physiques des phénomènes posant la question de l'existence de cette « matière noire » est adossée une théorie mathématique soutenant l'interprétation choisie. Sans trancher sur l'existence d'une telle « matière », qui demeure une question ouverte, nous pouvons observer que les modèles mathématiques proposés par l'un ou l'autre groupe de pensée le sont à la fois pour permettre une explication et des prédictions ultérieures mais aussi pour soutenir leur thèse. Ainsi le choix du modèle mathématique procède d'une attitude contingente du physicien et ses conséquences vont contraindre la pensée physique, la compréhension d'un ensemble de phénomènes, vers telle ou telle direction sans pouvoir préjuger de la véracité de ce choix.

Sur le choix des constantes attachées à chaque unité

Le choix de formuler les définitions des unités de mesure à partir d'un nombre restreint de constantes fondamentales est l'aboutissement de l'évolution de notre compréhension des concepts de la physique qui a conduit physiciens et métrologues, d'une part à ne plus définir une unité à partir d'un artefact, et d'autre part à choisir comme référence un élément stable en tout point de l'espace-temps et attaché à une réalité plus profonde de la physique, les constantes fondamentales. Ce processus d'évolution a nécessité, comme nous l'avons expliqué au chapitre 3, la vérification de l'indépendance de la valeur numérique de ces constantes par rapport aux conditions de leur mesure, notamment au lieu ou à l'instant de cette mesure.

La première question qui s'est donc imposée aux physiciens était une éventuelle variabilité de la valeur de certaines constantes en fonction des conditions opérationnelles de la détermination de leur valeur numérique. Nous avons vu que les mesures réalisées à partir de 2011 semblent converger vers une invariabilité des constantes fondamentales à l'exception de la constante de structure fine α pour laquelle un doute subsiste encore. Une des difficultés dans l'établissement de cette invariabilité des constantes en fonction des procédures mises en œuvre pour la mesure de leur valeur numérique est la reproductibilité des dispositifs utilisés ; il semble qu'un grand nombre de dispositifs réalisés en physique par un laboratoire donné, et reproduit dans un autre lieu à l'identique, ne conduise pas nécessairement aux mêmes résultats numériques[191].

Les questions suivantes vont se rapporter à plusieurs aspects se rapportant à la nature de ces constantes : que sont-elles ?, que représentent-elles ? Pourquoi apparaissent-elles de façon nécessaire dans le formalisme algébrique ?

Nature des constantes

Définir la nature des constantes fondamentales ou Universelles n'est pas chose aisée : nous avons rappelé que chacune d'elle comporte une part de conventionnalisme et une part de réalité indépendante de tous les formalismes choisis par les physiciens pour construire des modèles explicatifs et prédictifs des phénomènes physiques.

Une constante fondamentale établit un lien relationnel, mais aussi un lien formel, entre deux types de grandeurs a priori non liés par une même théorie physique. Par exemple, la constante de Planck h qui relie le concept d'énergie à la fréquence d'une onde électromagnétique, donc à l'électromagnétisme, ou la vitesse de la lumière, c, qui lie le concept de distances à celui de temps, les réunissant dans une même catégorie plus générale, plus fondamentale, celle d'un espace-temps doté d'une dynamique.

Les physiciens[192] interprètent l'apparition de ces constantes comme le signe de l'existence d'une réalité plus fondamentale, une représentation du monde au-delà de celle proposée par les lois actuelles de la physique. La synthèse que nous incite à réaliser ces constantes nous conduit vers un nombre plus réduit de théories fondamentales, une nouvelle description de notre Univers. Pour comprendre cette position il nous faut définir, au préalable, ce que nous entendons par « théories fondamentales » et « notre réalité ».

Pour l'homme de la rue, le réel est ce qui est perceptible par son système sensoriel éventuellement amélioré par une instrumentation adaptée (un microscope pour voir le monde microbien ou cellulaire, un télescope pour observer les objets célestes lointains, …). Nous savons, notamment depuis les travaux d'Einstein, que le réel contient également des éléments, des grandeurs qui échappent totalement à notre système de perceptions sensorielles ; c'est par

[191] Baker M., 2016, Is There a Reproductibility Crisis ?, Nature, vol. 533, 26 may
[192] Barrow J. D., Les Constantes de la Nature, 2005, éditions Odile Jacob, p. 16

exemple le cas des ondes gravitationnelles et donc de la structure substantielle de l'espace-temps ou le monde microscopique, celui des atomes et des particules élémentaires.

Les ondes gravitationnelles, qui ont été prédites par la théorie de la relativité générale, n'ont pu être détectées et mesurées que récemment au prix de l'utilisation de moyens technologiques exceptionnels. Ces ondes correspondent à des oscillations de la trame de l'espace-temps que nous ne pouvons percevoir car l'espace-temps est sans structure, bien que substantiel, et n'agit que par le biais de cette déformation à laquelle nous ne sommes pas sensible. L'existence de ces ondes nous a été révélée par le modèle mathématique utilisé par Einstein dans sa théorie de la relativité générale, et sans celle-ci aucun des instruments de mesure actuels n'aurait été capable d'en révéler l'existence.

Ces constantes nous indiquent les liens entre théories nous guidant ainsi dans leur synthèse :

La constante de Planck h établit un lien entre énergie et temps,

La constante c, entre espace et temps,

La constante G entre masse et espace-temps,

La constante e, la charge élémentaire pose, elle, plus de difficultés : l'ensemble des relations mathématiques dans lesquelles elle apparaît en électromagnétisme et en mécanique quantique n'établit pas de liens autres que ceux relatifs à la force résultant de l'interaction entre deux charges électriques, le lien étant expliqué par le postulat de l'existence du champ électrique conséquence de la nature de ces charges. Néanmoins, nous pouvons, à partir des expressions mathématiques établies dans le cadre des théories de l'électromagnétisme classique et quantique, avancer l'idée que la charge électrique joue un rôle de synthétiseur entre le concept de matière et celui de champ.

Mais un champ n'est pas une grandeur propre aux seules lois de l'électromagnétisme ; la mécanique quantique associe à toute particule un champ la définissant entièrement en permettant, notamment, d'apporter une explication à la masse comme le résultat de l'interaction de ce champ représentatif de la particule avec un autre champ, scalaire celui-là, et lié à la nature même du vide, donc de l'espace-temps si l'on se réfère à l'autre théorie fondamentale, la relativité.

Le modèle standard, branche de la mécanique quantique, décrit les particules comme presque toutes pourvues d'une charge électrique, simple, comme l'électron, ou résultante d'une agglomération de plusieurs charges individuelle. C'est par exemple le cas pour les deux particules constituant les noyaux atomiques que sont les protons et les neutrons. Les charges élémentaires présentes dans chacun de ces deux types de particules sont portées par des particules élémentaires, les quarks. Ainsi le monde matériel est majoritairement constitué de quarks et d'électrons. L'existence en tant que telle d'une charge, pouvant être soit considérée comme distincte du caractère matériel d'une particule, soit comme une simple caractéristique d'une particule de matière au même titre que la masse, est encore en ce début du 21ème siècle une question ouverte.

Le rôle de synthétiseur de concept, caractéristique requise par le classement proposé par Lévy-Leblond pour atteindre le statut de constante Universelle, ne semble pas pouvoir être rempli par la charge électrique présente dans l'électron (voir § 2.3). Pourtant le CODATA reconnaît un statut de constante fondamentale à l'électron en tant que porteur de la charge unité. Cette décision est compréhensible car bien que l'électron ne vérifie pas ce critère de synthétiseur de concepts, il n'en reste pas moins une constante fondamentale dont la physique moderne ne peut se passer : que deviendrait toute l'électromagnétisme et l'électricité en générale sans cette constante fondamentale. Le pragmatisme industriel et métrologique va se satisfaire du seul statut de constante fondamentale. Pourtant cette difficulté que nous avons à accorder le statut de constante Universelle à cette constante e nous interpelle sur le particularisme de l'électromagnétisme vis-à-vis des autres théories fondamentales de la physique. Einstein le reconnaissait puisque les incohérences engendrées entre

l'électromagnétisme classique et la mécanique newtonienne à propos de la loi de composition des vitesses ont été pour partie à l'origine de l'énoncé de la théorie de la relativité restreinte. Mais bien que cette théorie relativiste de la mécanique ait aplanie certaines difficultés, d'autres ont persisté ; c'est le cas notamment de la nature du champ électrique se propageant dans l'espace-temps. Ce champ ne peut être considéré, comme nous l'avons expliqué dans l'analyse de la charge électrique unité e, comme une perturbation de la trame de cet espace-temps au même titre que les ondes gravitationnelles car ces deux phénomènes sont de natures différentes. Si le champ électrique modifiait la structure de l'espace-temps en le courbant alors les charges et les masses auraient des interactions mutuelles, ce qui n'est pas constaté empiriquement. Si les phénomènes électromagnétiques apparaissent comme décrit correctement par la mécanique relativiste, la nature des charges électriques et des champs électriques et magnétique associés restent incomprise dans le cadre de cette théorie. Ils font partie intégrante de la mécanique quantique et plus particulièrement de la théorie quantique des champs, mais leurs natures restent incomprises.

Ainsi la nature de la charge électrique élémentaire et du champ électrique associé restent pour partie une question ouverte. Ce particularisme de la constante e nous suggère qu'il serait intéressant de l'utiliser comme l'un des fondements d'un système naturel d'unités. Nous allons revenir plus loin sur cette possibilité.

Nombre de constantes fondamentales et de constantes Universelles

Le nombre de constantes reconnues par le CODATA, et donc la communauté scientifique, diffère de la liste des constantes Universelles telle que nous l'avons établi dans cette étude ; là où le CODATA reconnaît dix constantes fondamentales : c, e, h m_e, m_p, μ_0, ε_0, G, N_a et k; nous ne reconnaissons que trois constantes Universelles : c, e, h. Parmi les constantes fondamentales listées par le CODATA, certaines ne trouvent leur justification que dans le compromis nécessaire entre les différents états signataires du SI et les groupes professionnels ayant des intérêts économiques communs. Par exemple, pourquoi retenir deux masses de particules, celle de l'électron et celle du proton alors que la connaissance de l'une d'elle et le rapport des deux suffiraient. Les raisons du maintien de cette dernière masse comme constante fondamental sont multiples :

Il représente la masse du noyau de l'atome d'hydrogène, atome dont le comportement quantique est entièrement calculable,

Il est composé de quarks, briques élémentaires des particules composites n'existant que dans les noyaux des atomes présents dans notre Univers et jamais à l'état libre,

Il est la particule composite la plus stable que nous connaissions, aucune désintégration spontanée n'a jamais été observée,

Il est un des deux éléments de base du noyau de chaque atome,

Il est une des particules dont les caractéristiques sont les plus facilement mesurables.

En adoptant une stratégie de réduction du nombre de constantes fondée sur leur irréductibilité, le CODATA[193] arrive à cette liste retreinte de constantes fondamentales : c, e, h m_e, m_p, μ_0, ε_0, G, N_a et k, soit un total de dix constantes reconnues comme fondamentales. Si l'on applique les deux conditions additionnelles pour obtenir le statut de constantes Universelles, ce nombre se réduit à trois[194,195], quatre[196], et même parfois cinq constantes selon

[193] CODATA : September 2016 in Reviews of Modern Physics https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.035009

[194] Uzan J.-P. entretien privé, octobre 2018

[195] Nous soutenons que trois constantes universelles doivent être reconnues : c, h et e

[196] Cohen Tannoudji G., 2005, Einstein et les constantes universelles, Présentation GICOTAN, http://gicotan.club.fr

les physiciens et les métrologues interrogés. Cette absence de consensus sur le nombre de constantes Universelles mérite une réflexion plus approfondie.

Le maintien de cette masse du proton parmi le groupe des constantes fondamentales est justifié pour des raisons pratiques liées à la réalisation des dispositifs de mesures et à des considérations économiques relatives, notamment, à la réalisation et à l'utilisation de dispositifs tels que les accélérateurs de particules dont l'efficacité est accrue par des collisions frontales entre protons, plus énergétiques que celles entre électrons, particules moins massives. Mais le proton est une particule composite et certaines de ces caractéristiques, comme par exemple la masse, ne sont pas totalement comprises. Par contre le rapport entre les masses de ces deux particules peut être mesuré avec précision. Enfin, l'électron offre l'avantage d'être le support de la charge électrique unité et d'être dépourvu de structure interne. Nous pensons pour cette raison, qu'il serait préférable de retirer cette masse du proton de la liste des constantes fondamentales.

Pourquoi également accorder ce statut aux trois grandeurs c, ε_0 et μ_0 alors qu'elles sont liées par une même relation :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Historiquement, la permittivité du vide ε_0 a été introduite en électrostatique dans la loi de Coulomb, alors que la constante magnétique μ_0 a été introduite en magnétostatique dans le théorème d'Ampère. Dans l'ancienne définition de l'ampère, la perméabilité magnétique du vide, μ_0, est fixée conventionnellement à une valeur numérique correspondant à $4\ \pi\ 10^{-7}$ exactement. Cette valeur est celle que nous retrouvons dans la structure des équations de Maxwell. La perméabilité électrique du vide, ε_0, est calculée, elle, à partir de la valeur mesurée de la constante c. la valeur numérique conventionnelle attribuée à la constante c à partir des résultats de mesure les plus précises à ce jour entraîne une détermination de cette perméabilité du vide à partir des seules mesures directes et de ce fait, cette constante acquière le statut de constante fondamentale, statut qu'elle n'avait pas pouvant être calculée à partir de la relation mathématique la liant à la constante c. La constante μ_0 quant à elle ne peut, selon nous, prétendre au statut de constante fondamentale car sa valeur numérique est purement conventionnelle.

Nous avons vu au chapitre 2 que les constantes N_a, G et k présentaient certaines difficultés leurs interdisant de prétendre également au statut de constantes fondamentales : le nombre d'Avogadro est purement conventionnel et même si sa définition conduit à l'accès à sa valeur numérique par l'unique voie de la mesure empirique, son caractère contingent l'empêche d'acquérir ce statut ; la constante G de gravitation pourrait mériter ce statut si les métrologues démontrent que la dispersion des résultats obtenus lors des mesures réalisées récemment ont une origine physique telle qu'elle ne remet pas en cause le caractère de constante de G.

Si la constante de Boltzmann est préférée par les physiciens à la constante R des gaz parfaits pour obtenir le statut de constante fondamentale, c'est probablement parce que la constante de Boltzmann *k* permet de relier le concept d'énergie à une unité contingente, le degré Kelvin, pour mesurer une grandeur également contingente, la température. On aurait tout aussi bien pu mesurer la quantité d'énergie présente dans des atomes ou molécules de matière à l'aide d'une autre unité dérivée directement des trois unités primaires, le Joule. Mais le degré Celsius ou le degré Kelvin simplifie grandement les écritures des relations mathématiques et sont facilement compréhensibles et utilisables par le plus grand nombre de personnes, d'où son adoption et sa conservation au cours des siècles. Par ailleurs, attribuer à cette constante k le qualificatif de fondamentale permet également de conférer à l'entropie, qui l'utilise dans sa définition, un statut de concept fondamental bien que sa formulation soit contingente : l'entropie est conceptuellement un choix arbitraire d'une définition de la mesure du désordre d'un ensemble

d'objets ; l'entropie est définie comme le nombre d'états d'énergies différentes pouvant exister statistiquement dans un volume occupé par un grand nombre d'objets similaires.

$$S = k_B \ln \Omega_n$$

Où n représente le nombre d'objets contenu dans le volume et Ω le nombre d'états d'énergie possibles. L'entropie représente une grandeur très utilisée en physique statistique et en thermodynamique d'où l'intérêt pour les physiciens et les industriels utilisant cette discipline de la physique de disposer d'outils simples et efficaces.

En résumé, nous proposons une nouvelle liste de constantes fondamentales, réduite par rapport à celle officielle du CODATA : c, e, h m_e, ε_0, le statut de la constante de gravitation G restant réservée dans l'attente de nouvelles mesures permettant de lever la question ouverte d'une éventuelle dispersion, observée dans l'état des mesures actuelles.

Nous avons expliqué que les constantes fondamentales c, e et h vérifiaient les deux conditions supplémentaires pour être qualifiées d'Universelles. Pouvons-nous étendre cette reconnaissance aux constantes m_e et ε_0 ?

La masse n'est pas une grandeur ordinaire en ce sens qu'elle est définie comme le résultat d'une interaction entre un élément de matière avec un champ scalaire, propriété propre au vide. En physique quantique, selon le modèle standard, les particules sont entièrement décrites par un champ quantique, champ qui va interagir avec ce champ scalaire de Higgs définit en tous points de l'espace-temps considéré comme le vide. Ainsi une masse ne serait que le résultat d'une interaction et n'aurait pas d'existence indépendante. Ayant le caractère d'une caractéristique non liée de façon structurelle à la seule matière, il nous semble possible de considérer la masse comme une qualité et non comme une quantité.

Définir l'unité de masse à partir de la constante de Planck h nous apparait comme une hypothèse fondée car elle procède d'une représentation logique visant à relier les propriétés du vide, h représentant le quantum d'action élémentaire mais pouvant aussi être perçu comme le quantum de fluctuation minimal du vide.

Comment définir la constante de permittivité électrique ε_0 du vide ? Elle était historiquement calculée à partir de la valeur de la constante c et de celle, conventionnelle, attribuée à μ_0. Mais la valeur de c devenant également fixée par convention, il faut déterminer la valeur de la perméabilité magnétique du vide, μ_0, comme celle de ε_0 par une opération de mesure. Il faut donc choisir entre les deux constantes μ_0 et ε_0 laquelle sera qualifiée de constante fondamentale. Étant toutes deux reliées à la constante c, et cette dernière ayant le statut de constante Universelle, les constantes de perméabilité électrique et magnétique du vide ne peuvent accéder au même statut car au-delà de ce lien relationnel elles ne peuvent remplir le rôle de synthétiseur de concepts déjà assumé par la constante c. La réponse nous semble donc que la constante de permittivité électrique du vide ε_0 ne peut pas acquérir le statut de constante fondamentale.

Contingence ou nécessité du choix des constantes associées aux unités du SI

Si l'on considère les sept unités du SI, et plus particulièrement les trois unités primaires, le choix des constantes servant de base à leurs définitions respectives ne semble pas procéder pour toutes d'une nécessité, un choix qui s'impose aux physiciens et métrologues.

Le mètre est défini à partir de la constante c connue pour représenter la vitesse de la lumière dans le vide ; la définition du mètre est un temps de vol d'un photon dans le vide, donc à la vitesse c. Aucune autre constante connue ne semble mieux adaptée que celle-ci pour servir de base à l'unité de longueur. Ce choix n'est pas contingent mais procède d'une nécessité liée à la nature même de la constante c, à la dimension dans laquelle elle est décrite. Nécessité n'est pas synonyme d'une unique solution contrainte par notre compréhension de la réalité : le mètre a été antérieurement définit comme un multiple d'une longueur d'onde correspondant à une transition atomique particulière ; la nécessité dont nous parlons ici nous la trouvons dans les

concepts fondateurs de la mécanique relativiste. La constance de cette vitesse de la lumière et son utilisation comme facteur de liaison entre les concepts de distance et de durée constituent le fondement de cette nécessité ; mais elle suppose une condition préalable : la définition de chaque unité par rapport à une unique constante fondamentale.

La seconde marque une exception au sein du SI cette unité reposant sur la caractéristique de fréquence de l'onde lumineuse émise par une transition entre deux niveaux d'énergies particuliers du césium 133, un saut quantique. Cette caractéristique, bien que constante, et a priori indépendante de la position de l'observateur dans l'espace-temps au moment de sa mesure, ne peut être assimilée à une constante fondamentale. Nous aurions pu choisir une autre transition et même un autre atome ; le choix assumé par les métrologues ne repose que sur des considérations de précisions, de simplicité de mise en œuvre et d'utilisation par un corpus de technologies à un instant donné. Le choix de cette transition énergétique est donc purement contingent. Mais le choix d'une transition optique particulière obéit, lui, à une nécessité physique : comment en effet pourrions-nous mieux obtenir une grandeur directement représentative de la seconde qu'en comptant les périodes d'une onde lumineuse.

La nature de la masse a longtemps posé la question de la constante fondamentale qui pourrait servir de base à la définition du kilogramme. Parmi les constantes fondamentales que nous avons listées ou celles acceptées par le CODATA, aucune n'établit un lien direct avec le concept de masse à l'exception des masses des particules élémentaires elles-mêmes. Alors pourquoi physiciens et métrologues se sont-ils mis d'accord sur le choix de la constante de Planck h ? La raison de ce choix est une conséquence de l'état de nos connaissances dans le domaine de la physique, plus particulièrement des technologies dont nous disposons pour mesurer cette constante et qui offrent la possibilité d'atteindre l'objectif de précision que réclament le monde industriel. La mise au point de la balance du watt n'est que la conséquence logique de l'évolution historique des dispositifs de comparaison de forces de nature électrique et de nature mécanique, en l'occurrence celles liées à l'attraction gravitationnelle de Newton. Mais que mesurons-nous lorsque nous posons une masse sur le plateau de la balance du watt ? Nous ne mesurons pas la masse comme caractéristique d'une certaine quantité de matière, mais la masse comprise comme l'adaptation de la courbure locale de l'espace-temps à la présence d'une quantité de matière, c'est-à-dire la faculté de cette matière à minimiser son énergie potentielle vis-à-vis de cette courbure, l'intensité de son évolution vers un « creux local » de la courbure de la trame de cet espace-temps. Ce que nous mesurons c'est le résultat d'une interaction entre plusieurs quantités de matières, celle dont nous cherchons à déterminer la valeur et toutes les autres quantités de matière constituant le dispositif de la balance elle-même ainsi que le laboratoire de mesure dans sa totalité. Si la balance du watt était placée dans un espace vide éloigné de toute autre masse, et en négligeant ses propres interactions internes des différentes parties du dispositif, elle ne mesurerait qu'une masse nulle ce qui serait un résultat faux mais cohérent par rapport à la nature de la masse telle que nous la comprenons aujourd'hui. Ainsi, mesurer la masse d'une certaine quantité de matière c'est en quelque sorte mesurer l'interaction de cette quantité de matière avec une autre plus importante et servant de référence (la Terre dans le cas des métrologues) en considérant le vide-espace-temps comme agent médiateur. Le concept de masse doit ainsi être compris en termes d'interactions avec le reste de l'Univers.

Nous devons également considérer que les particules de matières peuvent exister à l'état latent dans le vide : ce sont les particules virtuelles qui peuvent être extraites du vide soit temporairement de façon statistique ou en présence d'un élément de perturbation comme par exemple la présence d'un champ magnétique, soit de façon permanente par apport d'une quantité d'énergie extérieure par exemple sous la forme de photons. Ainsi, par apport d'une énergie de 2 x 511 keV on va générer l'extraction du vide d'un couple électron – positron conformément à la prédiction faite par Dirac. Ces possibles extractions du vide de particules virtuelles ou non démontrent le lien fort de nature existant entre la matière et le vide-espace-

temps. La masse peut donc être définie comme la caractéristique de la matière qui va quantifier l'intensité de la propension de la matière à minimiser son énergie potentielle vis-à-vis de la structure de la trame de l'espace-temps. Le choix de la constante de Planck h qui représente le quantum d'action minimal, et également le quantum de perturbation de l'énergie de ce vide-espace-temps, apparaît comme le meilleur choix pour servir de base à la définition de l'unité de masse. Si la constante h n'est pas nécessaire au sens premier du terme, c'est-à-dire une obligation dans la définition de l'unité de masse, elle n'en est pas moins la seule constante qui concrétise ce lien entre matière, masse et le vide-espace-temps. Le choix de cette constante ne nous semble pas qualifiable de contingent au regard de l'interprétation que les physiciens ont des lois empiriques de la mécanique quantique.

Cependant, comme nous l'avons vu, ce n'est pas sur la seule constante h que la définition de la masse repose : elle fait intervenir également la charge de l'électron e (voir § 3.3) par son rapport avec la constante de Planck h ($\frac{h}{2e}$ et $\frac{h}{e^2}$). La charge de l'électron possède-t-elle également ce lien fort avec la structure de l'espace-temps ? Cette question reste encore ouverte à ce jour comme nous l'avons vu plus haut. Par ailleurs cette charge électrique élémentaire a été choisie pour définir l'unité de courant, l'ampère ; cette constante ne peut donc apparaître en tant que telle dans la définition de l'unité de masse qui ne fait mention que de la constante h. De ce fait le choix de la constante h, en coopération avec la constante e, mais en ne faisant mention dans la définition que de la constante h, est un acte contingent posé pour assurer la cohérence de la structure du système d'unités : une constante et une seule à la base de la définition de chaque unité, une constante fondamentale ne pouvant servir que pour une seule unité. Nous venons de voir cependant que la définition du kilogramme constitue une exception à cette règle.

Indépendance des constantes Universelles entre elles

Toutes les constantes peuvent être considérées comme une conséquence de la structure des théories mathématiques utilisées pour modéliser les lois physiques telles qu'elles sont comprises par les physiciens. Des phénomènes physiques sont observés, mesurés selon un système d'unités prédéfini, analysés et théorisés aux regards des connaissances scientifiques à un instant donné, puis finalement modélisés selon un ensemble de relations mathématiques dans un formalisme choisi pour optimiser la simplicité d'écriture et de calcul. Cette modélisation vise à atteindre plusieurs buts : vérifier que ces équations mathématiques permettent de prédire la bonne valeur pour les grandeurs observées dans les phénomènes rattachés à une théorie physique et prédire un certain nombre de résultats numériques et de phénomènes pouvant être ultérieurement vérifiés ou falsifier si la théorie physique ou le modèle mathématique sont faux, incomplets ou simplement inadaptés.

Toutes les constantes que nous considérons comme Universelles apparaissent de façon nécessaire dans les modélisations mathématiques des théories physiques fondamentales exprimées dans le cadre du système international d'unités en vigueur, le SI de 2019.

Nous avons vu que trois constantes fondamentales peuvent sans conteste prétendre au qualificatif de constantes Universelles : la constante c, la constante de Planck h et la charge élémentaire portée par l'électron e^- ou par le positron e^+ ; à ces trois constantes il faut ajouter la fréquence de transition choisie pour l'atome de césium, qui sert de fondement à la définition de la seconde, bien que cette fréquence procède d'un choix a priori, puisse donc être qualifié de contingent, et ne peut, selon nous, être reconnue comme constante fondamentale. Qu'ont en commun ces constantes ? Peut-on établir un lien entre elles, et si c'est le cas quelles seraient les conséquences sur la définition du système d'unités et en particulier sur les trois unités définies à partir de ces constantes : le mètre, le kilogramme et l'ampère.

À la première constante, c, on attribue la dimension d'une vitesse ; elle est une des bases de la théorie de la mécanique relativiste, de la définition de l'espace-temps, concept proposé par

Einstein. La seconde constante, le quantum d'action h est le quantum fondamental de la mécanique quantique et peut être appliqué à toutes les grandeurs mesurées a priori. La dernière, la charge élémentaire portée par l'électron, ou son antiparticule le positron, est le quantum fondamental sur lequel repose les lois de l'électromagnétisme.

À première vue il n'y a aucun lien entre ces constantes. Chacune d'elles est un fondement d'une des trois grandes théories de la physique actuelle : la relativité qui soutient notamment que l'espace-temps existe, qu'il a une substantialité dépourvu de structures et que seules les durées sont mesurables ; la mécanique quantique qui quantifie toutes les formes d'énergies, abandonnant le concept de grandeur continue, en posant le quantum d'action h comme valeur minimale de quantum et qui énonce que tout résultat de mesure va donner une probabilité de résultat parmi un ensemble de valeurs distinctes, et non une valeur certaine ; l'électromagnétisme qui définit les interactions et les relations à distance entre un ensemble de charges portées par des particules de matières et la propagation de l'énergie électromagnétique sous forme de photons de masse nulle.

Ces trois théories scientifiques constituent avec la physique statistique le corpus de base de la physique théorique dont les scientifiques déduisent la représentation du monde tel que nous le concevons aujourd'hui. À cette représentation du monde, pour en mesurer toutes les grandeurs, nous associons un système d'unités et quatre dimensions primitives (distance, durée, masse et charge électrique) en accord avec les théories physiques de ce corpus.

Mais les physiciens recherchent en permanence à regrouper ces théories dans une seule, que certains n'hésitent pas à qualifier de théorie du tout[197], l'unification de l'ensemble des lois connues en une unique théorie donnant la description finale de notre réalité, de l'Univers. Corrélativement à cette quête, les physiciens cherchent également à simplifier le système d'unités en réduisant leur nombre. C'est ainsi, par exemple, comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.9, que les physiciens des particules ont conçus un système d'unités particulier ne comportant plus qu'une seule unité, l'énergie, qu'ils expriment généralement en électronvolt. Le système auquel on aboutit permet d'exprimer les distances et les durées comme l'inverse d'une énergie et la masse comme une énergie. Mais, nous l'avons montré, cette simplification ne correspond pas à une vérité fondamentale de la réalité, elle procède simplement d'un choix contingent pratique qui va ramener l'ensemble des grandeurs utilisées en physique des particules à des fonctions de l'énergie. Ce n'est pas parce que l'on décide de transformer les constantes en nombres purs que l'on se rapproche d'une compréhension ultime de la réalité. Cette simplification permet, certes, de simplifier les calculs et également l'interprétation des mesures dans les collisionneurs de particules mais au prix d'une perte d'informations sur la description détaillée de cette réalité. En se concentrant uniquement sur l'obtention des résultats recherchés dans ces collisionneurs, les physiciens gagnent du temps mais perdre de nombreuses informations qui pourraient peut-être leur être utiles dans leur processus de représentation de la réalité.

Ces trois constantes Universelles, auxquelles il faut ajouter la transition du césium choisie pour la seconde, nous indiquent que notre réalité, ou du moins ce que nous en connaissons par l'exploitation de nos perceptions sensorielles et leur prolongement, peut être décrite à partir de quatre unités primaires et non trois comme l'on a l'habitude de le dire. Cette réduction du nombre des constantes universelles à trois nous interroge sur la nécessité d'une quatrième unité primaire, la quantité de charge électrique. Ce choix amène une question ouverte : si la quantité de charges électriques peut s'exprimer comme une fonction des trois unités primaires historiquement reconnues, pour quelle raison devrions-nous renoncer à exprimer la dimension d'une charge électrique à partir des trois dimensions primaires ? En exprimant la quantité de charges dans une dimension composite commettons-nous une erreur ? Cette question pourrait

[197] Kane G., 2003, Supersymétrie, Le Pommier

être reformulée de façon différente, mais conceptuellement équivalente : quel est le lien relationnel entre d'une part la nature de l'espace-temps et de la masse et la nature de la charge électrique d'autre part ?

Il est vrai que l'on peut exprimer la charge électrique élémentaire e à l'aide des trois dimensions que sont les distances, les durées et les masses, mais cette dépendance dimensionnelle ne doit, selon nous, n'être considérée que comme une dépendance apparente due au choix arbitraire des dimensions primitives et des unités primaires nécessaires pour décrire notre Univers. On aurait pu, par exemple, choisir une unité de volume en place de celle des longueurs, sans changer la capacité descriptive du système d'unités. Les trois unités de longueur de durée et de masse sont suffisantes pour mesurer toutes les grandeurs que nous connaissons.

Les charges électriques font partie intégrante de notre réalité accessible par nos sens. Elles n'existent pas à l'état pur et sont nécessairement portées par des particules de matières pourvues d'une caractéristique de masse non nulle. En se fondant sur les interactions mécaniques qu'exercent ces charges entre elles, et qui sont transmises mécaniquement aux particules sur lesquelles elles existent, il est possible d'écrire une relation mathématique entre ces forces et deux charges électriques statiques mises en présences. On en déduit alors par analyse dimensionnelle la dimension de la charge qui va se trouver exprimer comme une combinaison des trois dimensions primaires : les longueurs, les durées et les masses.

$$F = \beta \frac{qq'}{d^2}$$

Où β représente une constante numérique. L'équation aux dimensions s'exprime par la relation :

$$[F] = \frac{[Q]^2}{[L]^2} = [MLT^{-2}]$$

Soit finalement :

$$[Q] = [M]^{1/2}[L]^{3/2}[T]^{-1}$$

Ici nous admettons, selon l'électromagnétisme de Maxwell, que les interactions entre charges peuvent s'écrire selon cette expression. Nous assimilons l'interaction entre les deux particules comme celle résultant des seules charges électriques, l'interaction entre les masses étant négligeable. Cette expression résultant des équations de Maxwell, dans une configuration stationnaire, nous donne un résultat numérique en accord avec les observations empiriques, ce qui ne signifie pas nécessairement que cette expression traduise correctement la nature de cette interaction à distance, de la même façon que l'attraction gravitationnelle de Newton ne traduit pas la réalité de l'interaction entre masses qui se fait par courbure de l'espace-temps même si la valeur numérique obtenue en constitue une excellent approximation dans la plus part des cas.

Ainsi la réduction du nombre des unités primaires à celles dont la dimension ne peut se déduire de celles d'un sous ensemble ne peut pas être nécessairement considéré comme correspondant à un système d'unités indépendantes. Admettre que la charge électrique est également une dimension primitive et que son quantum, la charge de l'électron constitue une unité primaire n'est pas intuitif et conduit une interrogation sur la nature profonde des liens relationnels entre la mécanique relativiste et l'électromagnétisme.

Dans l'état de la science physique actuelle, nous soutenons, en accord avec certains physiciens, que[198] quatre constantes Universelles, fondement de quatre unités primaires, sont nécessaires : la constante c pour le mètre, le saut quantique du césium pour l'unité de durée,la seconde, la constante de Planck pour le kilogramme et la charge de l'électron pour l'ampère.

Ces quatre constantes sont-elles indépendantes dans le sens où elles se rapportent à des grandeurs sans lien entre elles, ou bien certaines sont-elles liées à un type de grandeur particulier

[198] Ducanson W. E., 1941, The Dimensions of Physical Quantities, Proc. Phys. Soc., 53, 432-448

ouvrant pour le physicien une direction de progression dans sa quête d'une théorie unificatrice plus fondamentale.

Einstein, dans la théorie de relativité, défend l'idée que le temps doit être compris comme une dimension spatiale, elle-même liée à la structure d'une grandeur plus générale les englobant, l'espace-temps. Par ailleurs, la constante de Planck h est, elle, considérée comme le quantum des fluctuations du vide, vide quantique, mais également de l'espace-temps selon l'interprétation d'Einstein qui assimile l'espace-temps au vide et à l'éther des anciens en lui conférant deux caractéristiques essentielles : être sans structure et satisfaire aux transformations de Lorentz, donc être d'énergie nulle en moyenne. Les charges électriques sont décrites dans la physique moderne comme ayant la capacité d'interagir à distance. Cette interaction se fait par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique composé d'un champ électrique et d'un champ magnétique, traduction de la dynamique des charges par rapport au repère d'observation. Nous avons expliqué (§ 2.3) que ce champ électrique ne pouvait être l'expression d'une courbure de l'espace-temps car alors charges électriques et masses pourraient agir à distance, ce qui n'est pas observé empiriquement. Mais de façon certaine cette interaction à une relation causale avec le vide-espace-temps tel que défini par Einstein. Ces quatre unités primaires et les quatre constantes universelles associées présentent donc un lien avec le vide-espace-temps, conséquence logique du modèle standard du Big-bang[199] si ce dernier décrit correctement les premiers temps de l'histoire de notre Univers, des questions importantes restant ouvertes.

Sur la définition de la seconde

La seconde est à la fois la première des unités à s'être affranchie d'une matérialisation par un dispositif matériel et l'unité de la grandeur la plus difficile à définir. Chaque unité se réfère à une grandeur mesurable et décrite par les théories physiques fondamentales. La seconde est l'unité de temps, plus précisément l'unité de durée car définir une unité pour le temps absolu semble impossible[200]. À quelle loi se référer pour construire une définition de la seconde ? Toutes les théories modernes utilisent la variable temps, dans leurs modèles mathématiques descriptifs et prédictifs, pour décrire l'évolution des phénomènes, leurs dynamiques ; cette nécessaire présence de la variable temps prouve le rôle fondamental que joue cette grandeur pour les physiciens, même si sa nature profonde reste un mystère[201]. Alors quelle théorie choisir ? La science moderne, influencée par le monde industriel, privilégie la mécanique quantique car c'est de cet ensemble de théories que dépend une part de plus en plus importante de l'économie[202]. La mécanique quantique reconnaît la justesse de la théorie de la relativité restreinte qu'elle a assimilée dans son corpus théorique, et utilise pour prédire certains résultats par exemple ceux du domaine des collisions à hautes énergies.

La physique quantique pose comme postulat que le résultat d'une mesure ne peut être que statistique, un choix parmi un ensemble discret de valeurs possibles. Face à ce postulat, empiriquement vrai, et les développements des technologies mettant en œuvre les technologies induites par cette théorie, les physiciens et métrologues ont choisi comme unité de durée un multiple conventionnellement fixé de la durée de la période d'une émission d'onde électromagnétique lors d'une transition entre deux niveaux bien déterminés d'un atome choisi. Actuellement l'atome utilisé est le césium 133 et la transition est celle d'une raie hyperfine

[199] Rich J. A., 2010, Cosmologie, Vuibert pp. 39-46

[200] Saint Augustin, 397-401, Les Confessions, Gallimard, collection La Pléiade (1998), pp 1040 - 1041

[201] Rovelli C., 2018, L'ordre du temps, Flammarion

[202] Tous les composants utilisés par l'informatique et l'électronique en général, ainsi que les objets technologiques qui en résultent, reposent sur les lois déduites de la mécanique quantique

obtenue par une transition entre deux niveaux particuliers[203]. La seconde se réduit ainsi à un comptage du nombre de périodes de l'onde émise lors de la désexcitation d'un atome dans un état énergétique parfaitement défini.

Dans cette définition il est fait l'hypothèse qu'un saut quantique est compris et explicable[204] dans le cadre de la physique quantique, ce qui n'est pas totalement le cas, plusieurs questions connexes restants ouvertes :

Quelle est la nature du processus physique mis en œuvre dans un saut quantique ?

Quelle est la nature d'un photon, est-il de masse nulle, comment transporte-t-il de l'énergie ?

Existe-t-il un lien entre l'émission électromagnétique par un saut quantique et la nature de l'espace-temps ?

Tout phénomène physique peut être décrit en termes d'évolution temporelle et donc a priori toute loi physique pourrait servir à définir une unité de durée. Mais pour définir cette unité il faut sélectionner un phénomène dont la régularité, la constance est indépendante de sa position dans l'espace-temps : il doit être décrit par une loi, c'est à dire un ensemble de phénomènes scientifiques indépendants de l'espace et de l'instant de mesure[205]. En examinant les théories physiques et notamment les phénomènes expliqués dans le cadre de la physique quantique, la transition entre deux états énergétiques, le saut quantique semble être le seul phénomène pouvant à la fois être qualifié de constant et permettre une précision de mesure compatible avec les objectifs ambitieux requis par les différents secteurs de l'industrie et de la recherche. Ce consensus n'apporte pas de réponses aux questions ouvertes mais permet de libérer le potentiel créatif des ingénieurs du monde du microscopique ce qui est suffisant pour conforter ce choix de définition.

Une des conséquences du choix de cette définition de l'unité de durée est le statut de constante fondamental accordé par la communauté scientifique et économique de la fréquence de la raie hyperfine du césium. Cette transition ne peut se prévaloir du qualificatif de constante fondamental, accepté par le CODATA, car alors, toutes les innombrables transitions possibles de tous les atomes ou molécules connues doivent pouvoir également accéder à ce statut.

Ce qualificatif de constante fondamental dérogatoire à la définition proposée par Levy-Leblond cache notre impuissance à comprendre la nature du temps, à sa réalité. Le mètre est défini comme un temps de vol défini d'un photon se propageant dans le vide ; le phénomène considéré ici est la propagation d'une onde électromagnétique dans le vide dont la physique peut fournir une description et une explication cohérente même si de nombreux points constituent encore des questions ouvertes comme il a été mentionné plus haut. Mais le temps reste inexplicable bien qu'il fasse partie de notre vie quotidienne et rythme notre vie ; même en se restreignant aux durées, nous ne sommes pas certains de la réalité de cette catégorie de grandeurs, la question de la réalité du temps et donc de la durée reste une question ouverte.

Mais dans le cas de la seconde il n'est pas possible de s'appuyer sur un phénomène de ce genre mettant en œuvre une constante fondamentale reconnue dans de nombreux autres domaines. Les phénomènes astronomiques ont longtemps servi de référence à l'unité de temps[206], mais ont finalement dû être abandonnés car présentant des dérives temporelles qui

---

[203] La transition entre les niveaux hyperfins F = 4, M = 0 et F = 3, M = 0 de l'état fondamental 2S1/2 de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs, et que la valeur 9 192 631 770 hertz est assignée à la fréquence de cette transition

[204] Minev et al, 2019, Nature, vol. 570, pp. 200 - 204

[205] Smart John Jamieson Carswell, 1959, « Can biology be an exact science? », Synthese, (repris dans Philosophy and Scientific Realism, London, Routledge, 1963, chap. 3, « Physics and biology »)

[206] Jusqu'en 1960 (Résolution 9 ; CR, 86) la définition de la seconde correspondait à une fraction du jour solaire, puis a été modifiée pour faire référence à une fraction d'une année tropique présentant une dérive moindre et enfin abandonnées pour adopter aujourd'hui la mesure de la période d'un saut quantique : La seconde est 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

limitaient fortement la précision espérée. On ne connait pas de phénomène astronomique suffisamment stable pouvant servir de référence avec le degré de précision requis et mettant en jeu une des constantes fondamentales. S'il existe dans l'Univers des phénomènes physiques pouvant être utilisés comme référence, ils n'ont pas encore été observés par les astronomes. Par ailleurs, certains scientifiques[207] doutent de la réalité du temps et estiment qu'une physique sans variable temps est souhaitable pour améliorer notre représentation de l'Univers.

Le choix de l'atome de césium et d'une transition quantique particulière répond au souci de précision de mesure, de compatibilité des moyens technologiques disponibles actuellement. Certains[208] pensent qu'il faudrait abandonner cette référence du césium au profit d'atomes plus prometteurs comme l'hydrogène qui présente l'intérêt de pouvoir être entièrement modélisable et donc de rendre envisageable un accroissement de la précision.

Sur la définition du mètre

En reliant le mètre à la constante c, comprise ici comme la vitesse de la lumière dans le vide, on établit un lien entre cette unité et le modèle de l'espace-temps proposé par Einstein. Ce lien est confirmé par la définition de cette unité mesurée comme le temps de vol d'un photon, donc dépendante du temps par la durée de ce temps de vol. La théorie de la relativité restreinte nous enseigne en effet que le résultat de la mesure de toute distance entre deux points d'un objet va dépendre directement de l'observateur qui réalise cette mesure, de sa vitesse par rapport à l'objet mesuré ; cette théorie affirme ainsi un lien fort entre les concepts de durée et de longueur, donc d'espace. Le temps en relativité est d'ailleurs défini comme une dimension spatiale, la quatrième dimension de l'espace-temps.

Quelques physiciens[209] pensent que notre Univers ne peut être compris dans un espace-temps ne comportant que trois dimensions spatiales et une dimension temporelle ; ils soutiennent qu'une quatrième dimension spatiale est nécessaire et que celle-ci est liée à la structure interne même des particules qui composent la matière telle que nous la connaissons. Si cette hypothèse se révélait vraie, cette quatrième dimension spatiale aurait-elle des conséquences sur la définition actuelle du mètre : un temps de vol de photons dans le vide ? Nous pouvons en douter car dans le cadre de cette hypothèse avancée, la dimension spatiale additionnelle ne présente un lien qu'avec la structure interne des particules, ce qui n'a pas de conséquence sur la définition du mètre ; elle est sans lien causal avec cette dimension supplémentaire.

La théorie de la relativité générale définie la distance que va parcourir un photon comme une géodésique de l'espace-temps courbe. Ainsi si l'on cherche à mesurer la distance parcourue par une onde électromagnétique à proximité du Soleil la courbure de l'espace-temps va allonger la distance géométrique considérée comme le segment de droite dans l'espace tridimensionnel usuel reliant le point de départ et le point d'arrivée. Cette mesure a été réellement faite lors d'une mission d'exploration de la planète Mercure[210]. Lorsque la Terre et Mercure ce sont retrouvées dans une position diamétralement opposée et que Mercure était encore visible de la Terre bien, c'est-à-dire que la ligne droite reliant ces deux planètes passait à proximité du Soleil, la sonde a envoyé un message radio vers la Terre ; le temps mis pour arriver sur la station de

[207] Rovelli C., 2018, L'ordre du temps, Flammarion, pp. 113 - 152

[208] Bordé C. J., 2004, Métrologie fondamentale : Unités de base et constantes fondamentales, C. R. Physique 5, 813–820

[209] Bordé C., 2014, arXiv:1304.7201 et International School of Physics "Enrico Fermi" - Course on Atom Interferometry (2013)

[210] Cet effet est connu sous le nom d'effet Shapiro ; Gourgoulhon E., 2010, Cours de Relativité générale, Paris, Observatoire de Paris, universités Paris-VI, Paris-VII et Paris XI, p. 88 ; Irwin Shapiro, Fourth Test of General Relativity, Physical Review Letters, 13, 789-791 (1964)

détection était un peu plus long que si les photons avaient suivi une ligne droite, ce qui démontrait que la géodésique suivi par l'onde radio était courbée par la présence du Soleil. Ainsi la définition du mètre devrait préciser que le vol du photon utilisé pour définir l'unité de longueur, le mètre, est défini dans un environnement particulier, celui de la surface de la Terre, et que sa mesure sur une autre planète sera entachée d'une erreur due aux écarts de masses entre elles. La calibration du mètre sur Terre notamment va donc introduire une erreur systématique, par rapport à la définition telle que décrite, due à la présence plus ou moins éloignée de masses d'astres tels que la Terre ou le Soleil.

Introduire une quatrième dimension spatiale dont nous ne pouvons pas modéliser les effets en termes de courbure de l'espace-temps est une difficulté supplémentaire et reste une question ouverte pour une future redéfinition ou précision apportée à la définition du mètre unité.

Sur la définition de l'ampère

Le 26 novembre 2018 la valeur de la charge de l'électron, e, a été conventionnellement fixée, permettant l'adoption d'une nouvelle définition de l'ampère comme une quantité de charges, un nombre d'électrons, parcourant un fil conducteur pendant l'unité de durée, une seconde. Cette unité est dorénavant définie par un comptage de particules d'un même type passant devant un opérateur chargé de la mesure ; elle devient une unité quantique, le quanta de charge ayant un statut reconnu par la communauté scientifique, de constante fondamentale correspondant à la charge e^- de l'électron. De même que pour l'unité de longueur, le mètre, et l'unité de durée, la seconde, il n'y a nulle difficulté à comprendre ce que représente physiquement cette définition. L'unique question subsistante, fondamentale et qui reste ouverte, est la nature de ce que l'opérateur va compter : sont-ce des particules avec simplement une probabilité de présence vérifiant les relations d'indétermination d'Heisenberg ou des champs quantiques définis sur un vide-espace-temps dépourvu d'une structure mais capable de se déformer en présence d'une forme quelconque d'énergie. Mais en dehors de cette question concernant la nature réelle des électrons, et plus généralement de la nature d'une charge électrique portée par un élément de matière, notre représentation de la réalité par la seule voie de nos sens n'est pas mise en défaut : compter des électrons est compréhensible et surtout représentable aisément sous forme de nos schémas mentaux habituels. C'est donc une unité dont la définition est adaptée au monde de la recherche comme à celui de l'industrie.

En asservissant la définition de l'ampère à celle de la charge élémentaire associée aux électrons, et de façon plus générale à toutes les particules douées d'une caractéristique de masse, la question de la nature de la charge se retrouve sur le devant de la scène, au premier plan de l'intérêt des physiciens. Car pour compter les électrons il faut comprendre leur nature et donc se poser la question de la nature de la charge électrique, comme objet, et de son autre aspect le champ quantique associé à toute particule. Cette définition ne peut être que provisoire car cette question du double aspect corpusculaire et ondulatoire de l'électron porteur de la charge unité doit trouver une réponse appropriée. Ce double aspect est encore complexifié par la propriété, bien connu de tous les radioélectriciens, selon laquelle tout électron soumis à un mouvement accéléré, par exemple à un mouvement sinusoïdal, va rayonner de l'énergie sous la forme de photons. Ainsi nous pouvons attester que la nature de l'électron est reliée à celle des ondes électromagnétiques, confirmant ainsi l'existence d'un lien entre les constantes e et c. Comme par ailleurs la constante de Planck, h, est également reliée à l'électromagnétisme et donc aux constantes c et e, nous en déduisons que ces trois constantes e, c et h présentent un lien commun avec le vide-espace-temps. Constantes Universelles elles sont des synthétiseurs de concepts entre d'une part l'électromagnétisme, la lumière et la masse et d'autre part le vide-espace-temps. Ce lien conceptuel démontre également l'existence d'une réalité plus fondamentale,

donc d'une loi plus fondamentale réunissant ces grandeurs, loi qui n'est pas encore connu et qui reste une question ouverte pour les physiciens.

Enfin, les particules microscopiques satisfaisant aux relations d'indétermination d'Heisenberg, le comptage va soulever une difficulté : le courant électrique est un flux de charges passant en un endroit donné pendant une durée d'une seconde. Cette définition suppose que les charges électriques, donc les éléments matériels qui les supportent, par exemple les électrons, soient en mouvement. Ce comptage va consister en la détection de chaque électron passant devant un dispositif de détection placé à un endroit déterminé. L'intensité du courant sera alors définie par le nombre d'électrons passant en ce point pendant une seconde. Mais cette intensité dont l'on cherche à mesurer la valeur doit correspondre à une vitesse moyenne constante des électrons, cette condition conduisant à une grande imprécision sur leurs positions et donc sur l'instant de leur comptage. Soit l'intensité du courant est bien définie et alors la mesure de la position des électrons présentera une erreur importante, soit cette intensité fluctue de manière aléatoire et alors nous poussons compter précisément le nombre d'électrons passant en un point donné à un instant donné, ce qui conduira à une détermination précise d'une valeur moyenne du courant électrique.

Sur la différence de nature des unités de temps et de longueur

Les unités de temps et de longueur soulèvent une même question ouverte : leur nature, car nous ne pouvons pas « matérialiser » ces concepts.

Seul un petit nombre de philosophes ont tenté de définir le temps. Le premier d'entre eux fut Saint Augustin :

« Qu'est-ce donc que le temps? Si personne ne m'interroge, je le sais; si je veux répondre à cette demande, je l'ignore. Et pourtant j'affirme hardiment, que si rien ne passait, il n'y aurait point de temps passé; que si rien n'advenait, il n'y aurait point de temps à venir, et que si rien n'était, il n'y aurait point de temps présent. Or, ces deux temps, le passé et l'avenir, comment sont-ils, puisque le passé n'est plus, et que l'avenir n'est pas encore? »[211]

Plus tard, Descartes va essayer de formuler le rôle du temps dans l'organisation de l'Univers :

« *Descartes distingue temps et durée. Cette dernière concerne diversement toutes choses, alors que le temps intervient pour rassembler et comparer les premières. La durée correspond à ce qui est, ou existe, et le temps devient une simple façon de penser (Principes I 57). Le premier débat tourne autour de la question de la continuité du temps dans lequel Descartes soutient à la fois la contingence de la durée vécue et la continuité du temps* »[212]

Il est le l'un de ceux qui vont reconnaître que seules les durées sont accessibles à la mesure, le temps, lui restant un concept abstrait sans lien apparent avec le monde sensible si ce n'est son évolution, sa dynamique. Il va également poser la question de la continuité du temps dans un contexte historique de pensée qui est loin de la reconnaissance de la quantification intrinsèque du monde microscopique.

Emmanuel Kant, va tenter d'aborder cette question sous un angle nouveau : il va chercher à savoir « *qu'elle est la fonction dévolue au temps dans tout acte d'entendement* », ce qui le conduit à trouver une explication de la nature du temps et de son rôle dans notre monde.

Le temps apparaît comme n'étant pas un concept empirique, c'est-à-dire qu'il n'est pas une chose comme une autre,

[211] Saint Augustin, 397-401, Les Confessions, Gallimard, collection La Pléiade (1998), pp 1040 - 1041

[212] Troisfontaines Claude, « La temporalité de la pensée chez Descartes », Revue philosophique de Louvain, 1989, p. 5-22

Le temps est une représentation nécessaire a priori puisqu'il est la condition de possibilité des phénomènes. Il apparaît (à l'instar de l'espace), comme une forme a priori de la sensibilité, nécessaire à la constitution de l'expérience humaine. Cette forme est dite a priori parce qu'elle précède nécessairement les données sensibles de l'expérience, elle seule rendant cette expérience possible,

Le temps est un Universel présent dans toute expérience, que celle-ci concerne des objets extérieurs ou qu'elle soit intérieure, comme l'est l'imagination par exemple. Le temps n'est pas conceptuel, car un concept est construit à partir d'éléments plus simples que lui, or, un morceau de temps n'est pas plus simple que le temps entier,

Le temps n'est pas un concept parce qu'il n'est pas la simple représentation d'un caractère commun à une multitude, mais qu'il contient en soi une multitude de représentations, en ce sens il s'agit d'un Universel d'un genre particulier,

En tant que « grandeurs infinies » le temps avec l'espace forment un tout unique. Ils sont ensemble comme une forme sensible donnée dans une intuition immédiate et inséparable des phénomènes.[213]

Ce lien entre l'espace et le temps, Einstein va le conceptualiser en les réunissant dans un même objet qu'il nomme l'espace-temps. Il qualifie la variable temps, dans cette représentation, de quatrième dimension spatiale. Cette affirmation va lui permettre de modéliser l'espace-temps et d'expliquer, notamment, la gravitation par une déformation de la structure de ce dernier sous l'effet de la présence d'une masse ou d'une énergie, ces deux grandeurs étant de même nature. Einstein va aller plus loin, il va assimiler cet espace-temps au vide et même à l'éther des physiciens du 19ème siècle mais en ajoutant que cet éther doit être dépourvu de structures et de satisfaire les transformations de Lorentz, donc d'être d'énergie moyenne nulle.

« Le principe de la relativité restreinte nous interdit de considérer l'éther comme constitué de particules qu'on peut suivre dans le temps; mais l'hypothèse de l'éther comme telle ne contredit pas la théorie de la relativité restreinte. Il faut seulement se garder d'attribuer à l'éther un état de mouvement..... Mais on peut, d'autre part alléguer en faveur de l'hypothèse de l'éther un argument important. Nier l'éther, signifie en dernier lieu qu'il faut supposer que l'espace vide ne possède aucune propriété physique. Or les faits fondamentaux de la mécanique ne se trouvent pas en accord avec cette conception..... D'après la théorie de la relativité générale, les propriétés métriques du continuum spatio-temporel sont différentes dans l'entourage de chaque point spatio-temporel et conditionnées par la matière qui se trouve en dehors de la région considérée.... L'éther de la théorie de la relativité générale est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques et électromagnétiques.... D'après la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens par conséquent un éther existe. Selon la théorie de la relativité générale un espace sans éther est inconcevable, car non seulement la propagation de la lumière y serait impossible, mais il n'y aurait même aucune possibilité d'existence pour les règles et les horloges, et par conséquent aussi pour les distances spatio-temporelles dans le sens de la physique. Cet éther ne doit cependant pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables, c'est à dire comme constitué de parties pouvant être suivies dans le temps : la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée. »[214]

La théorie de la relativité, à l'opposé de la mécanique quantique est réaliste, les objets ont des propriétés qui existent indépendamment de l'acte de mesure, déterministe, le résultat d'une mesure n'est pas probabiliste sa valeur est déterminée entièrement par le système et ses conditions initiales. Bien que tout oppose ces deux représentations du monde, il existe deux points sur lesquels elles sont en accord :

---

[213] Dastur Françoise, Heidegger et la question du temps, Paris, PUF, coll. « Philosophies », 1990

[214] Einstein A., 1920, L'éther et la théorie de la relativité, conférence

L'espace et le vide peuvent être assimilés à un seul et même objet, même si dans un cas l'espace est tridimensionnel et quadridimensionnel dans l'autre,

Le vide ainsi défini est un objet réel et substantiel : ces deux propriétés du vide sont attestées par la présence en tout point du vide quantique d'un champ de Higgs, et par une métrique quadridimensionnelle, celle de la relativité générale, se déformant sous l'action causale de masse, ou de façon plus générale d'énergie.

Ainsi nous sommes amenés de façon naturelle à attribuer une réalité au vide sans pour cela revenir à la conception Newtonienne d'un espace vide comme repère absolu. Selon ces deux théories, l'espace peut se définir comme le contenant d'un agencement d'objets, la distance entre chacun d'eux n'étant qu'une conséquence de leur interaction. Le vide se trouve être alors comme ce qu'il y a entre ces objets et qui en assure le lien. Nous sommes ramenés à la question toujours ouverte de la relation entre objets et vide, entre matière et vide.

Mais si le vide est le lien entre ces différentes grandeurs, il doit assurer le transport de l'information, d'une énergie permettant d'expliquer l'enchaînement logique des événements. Si une première particule se déplace avec une vitesse uniforme et est déviée par une seconde, immobile dans le même repère inertiel, sous l'action gravitationnelle, que se passe-t-il réellement ? Quelles quantités sont échangées entre ces deux objets ? Einstein va répondre à ces interrogations que c'est précisément la déformation de la structure de l'espace-temps qui va assurer ce lien entre deux objets doués de masses non nulles. Est-ce à dire que les deux objets n'échangeront directement aucune information, la question reste ouverte.

Il n'existe aucune loi de la relativité restreinte établissant un quelconque lien entre le vide (l'espace-temps de la relativité, sans particules ni ondes électromagnétiques) et les objets réels manipulables. Les relations entre les longueurs et intervalles de temps, les durées mesurées dans deux référentiels en mouvement relatif avec une vitesse constante ne sont que l'illusion donnée à un observateur de l'un des référentiels, illusion ayant pour cause la vitesse finie de propagation de la lumière et son égale valeur dans les deux référentiels. Cette absence de causalité soutenue par Einstein n'est acceptable que dans le cadre de la relativité restreinte où les objets sont sans masse et où l'espace-temps est décrit par la métrique de Minkowski.

Le vide, comme l'indique Einstein, n'entretient aucun lien de causalité avec le monde qui nous est familier, notre Univers fait de particules et d'ondes électromagnétiques. Mais avec la théorie relativiste de la gravitation, la relativité générale, l'espace-temps est déformé par la matière : si nous considérons un espace vide de toute matière et de toute énergie électromagnétique, un espace dit de De Sitter, la topologie de l'espace-temps est plane. En introduisant une masse à un instant t_0, nous provoquons une déformation qui va s'établir de façon non instantanée et va propager l'information de la présence de cette masse à la vitesse de la lumière.

En l'absence de matière, ou de toutes formes d'énergie, le vide-espace-temps d'Einstein est sans déformation, sans potentiel de gravitation et toutes les géodésiques qui le décrivent sont des lignes droites. Ce vide-espace-temps est donc sans aucun point remarquable ou discernable et aucune distance n'est plus définissable.

L'espace-temps n'interagit avec les objets matériels de notre réalité que par sa déformation liée à la masse de ces objets. Le concept de distance est donc lié à cette déformation, l'absence d'objets présentant une masse conduisant à une distance définie par un temps de vol de photons sur une géodésique représentée par une ligne droite. Les distances ne peuvent ainsi être définies que comme la mesure de la topologie de l'espace-temps. Mais dans la définition de ce dernier intervient également la dimension temporelle. Chaque point de l'espace-temps étant définie par un vecteur de base composé de quatre vecteurs unités, l'un deux représentant le temps, la représentation spatio-temporelle est statique. La mesure des distances peut être comprise comme mêlant temps et espace, des grandeurs statiques. Chaque phénomène, chaque évolution

est déjà inscrite dans cet espace-temps qui décrit tous les événements du passé aussi bien que ceux du futur. Nous décrivons un monde entièrement déterminé par cette théorie.

En l'absence de temps, la mesure des distances est sans signification et hors de l'espace et des objets matériels qui le peuplent, le temps perd sa consistance. Ces deux grandeurs sont liées et consubstantielles à l'acceptation de l'existence d'un vide-espace-temps. Une mesure de distance n'aura donc une signification que par rapport à un observateur donné, la position de celui-ci définissant le résultat de la mesure. Pour un autre observateur en mouvement par rapport au premier, le résultat de la mesure sera différent. La mesure vraie dans cet espace quadridimensionnelle supposerait que l'on puisse s'extraire de celui-ci pour mesurer la distance entre deux points de l'espace-temps, donc situés dans notre passé ou notre futur. Ce que l'acte de mesure nous retourne comme information n'est que la mesure séparant deux points, deux événements sur une même géodésique temporelle et par rapport à une position d'observateur donnée.

Dans le cadre de la théorie de la relativité générale, la distance ds, entre deux événements A et B de cette variété de dimension 4, prend la forme :

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

Où t représente le temps absolu, grandeur mathématiquement existante, mais sans signification physique car non accessible par la mesure (il faudrait être hors de l'Univers pour cela), c la vitesse de la lumière et τ le temps propre, mesurable et lié au repère de mesure local d'un observateur. Cette définition de l'espace a plusieurs conséquences :

Si l'on suit un photon sur sa trajectoire, il va parcourir la distance

$D = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ en un temps $\Delta t = D/c$ ce qui conduit finalement à la relation $ds = 0$ ce qui implique $d\tau = 0$, que l'on peut interpréter comme l'absence de temps local pour un observateur se déplaçant à la vitesse de la lumière. La distance entre deux objets va pouvoir varier de façon continue et même devenir nulle pour une vitesse de déplacement égale à c. Quelle est la signification de cette prédiction théorique ? La physique ne répond pas complétement à cette interrogation.

Sur la définition du kilogramme

Cette étude étant principalement centrée sur l'unité du kilogramme, il n'est pas possible d'esquiver une discussion plus approfondie sur le statut du concept de masse et ses conséquences causales. Dans ce paragraphe nous allons examiner la compréhension des physiciens de ce concept fondamental et tenter de cerner les questions ouvertes sur ce sujet. Nous allons commencer par distinguer la différence entre masse pesante et masse inertielle, puis expliquer la façon dont nous comprenons la structure de la matière qui compose notre Univers, principale composante de la réalité qui nous est directement accessible par nos sens ou par les dispositifs de mesures. Enfin nous nous interrogerons sur le concept de masse et ses diverses implications sur les dispositifs qui vont être utilisés pour la mesure du kilogramme, la masse unité.

Masse pesante et masse inertielle

Définir une unité de masse, présuppose que l'on définisse précisément la nature de la grandeur que l'on cherche à pouvoir mesurer par comparaison avec une référence choisie dans les objets appartenant à cette catégorie d'objets, à cette grandeur. Le double concept de masse pesante et de masse inertielle est la mise en lumière de notre incompréhension profonde de la nature même de la masse d'un objet. La masse pesante fait référence à l'action de l'espace-temps sur tous les objets matériels dotés d'une caractéristique de masse, ou de la présence d'une énergie, la masse étant considérée, depuis l'énoncé par Einstein de son équivalence entre masse

et énergie par la relation $E = mc^2$, comme une quantité d'énergie localisée dans un volume limité. Mais les physiciens théoriciens ont développé une autre théorie, la théorie quantique des champs, qui conduit à expliquer cette masse pesante comme la conséquence de l'interaction de la matière avec un champ scalaire du vide, le champ de Higgs. Cette théorie ne fournit pas d'explication sur la nature de cette matière porteuse de la caractéristique de masse, qui reste une question ouverte. Par conséquent, selon notre représentation quantique du monde, nous ne pouvons pas définir la nature de la masse ce qui est une difficulté importante pour définir le fondement de la définition de son unité.

Qu'en est-il pour la masse inertielle ? sa manifestation la plus simple, nous l'éprouvons tous les jours lorsque nous effectuons un déplacement en voiture. Lors du démarrage de la voiture, nous soumettons celle-ci à une accélération pendant un certain laps de temps. Pendant ce dernier, nous ressentons une force proportionnelle à cette accélération qui tend à s'opposer à notre mouvement : c'est la force d'inertie qui utilise la masse inertielle présente dans notre corps. Les physiciens se sont demandés si ces masses étaient de natures différentes et si leurs valeurs au sein d'une même quantité de matière étaient de valeurs égales. La première mesure significative fut réalisée par Eötvös[215,216] puis suivie par d'autres[217,218] ; toutes conduisirent à l'égalité entre ces deux masses. À ce jour aucune divergence n'a été observée empiriquement. Fondamentalement, si l'on considère l'interprétation relativiste de la gravité, il n'existe aucun argument convaincant en faveur de l'égalité de ces deux masses. L'explication avancée aujourd'hui pour cette masse inertielle est le freinage engendré par le vide en réaction à un mouvement accéléré. Un effet allant dans le sens de cette interprétation a été empiriquement découvert lors de la mesure du champ de gravité terrestre par le satellite Gravity Probe B[219]. Ce phénomène, l'effet Lens Thirring, semble montrer que la force d'inertie est liée à un freinage du vide sur la matière accélérée, conduisant à l'existence d'une autre interaction du vide et de la matière, différente de celle du champ de Higgs, et s'appliquant sur la masse d'inertie. Les physiciens n'ont donc toujours pas de preuves montrant cette égalité, mais ont établi un même lien causal entre la nature de ces deux masses et le vide-espace-temps. Ce manque de compréhension de la nature de la masse s'il constitue un problème pour la définition d'une unité de masse, il permet de conforter le choix de la constante de Planck comme fondement de sa définition, cette constante étant directement liée au vide-espace-temps, en représentant le quanta de fluctuation.

Si la question de la différence de nature entre les masses graves et inertielles est toujours ouverte, les progrès de la physique montrent une cohérence dans le choix de la constante fondamentale sur laquelle repose maintenant l'unité de mesure des masses, le kilogramme.

La masse des particules composites comme le proton ou le neutron

À l'exception des leptons et des bosons, les particules présentes dans notre Univers sont composites : elles sont constituées de particules plus petites, supposées élémentaires, que nous appelons les quarks[220]. Cette description des particules constituant dans notre Univers est

[215] Eötvös R. v., 1890, , Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn, 8, 65

[216] Eötvös R. v., 1910, , in Verhandlungen der 16 Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung (London-Cambridge, 21-29 September 1909). G. Reiner, Berlin, 319

[217] Runge C., 1909, Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, No. 1, 37-41. Weidmann, Berlin

[218] Pekár D., Eötvös R. v., 1939, 50 years anniversary of the torsion balance, Budapest, p. 107

[219] Lancé en 2004, le satellite Gravity Probe B avait pour mission de tester l'effet d'entraînement des référentiels est bel est bien présent et conforme aux calculs de Josef Lense et Hans Thirring. Stanford's Gravity Probe B confirms two Einstein theories, Stanford Report, May 4, 2011; J. P. Palastro et al., Dephasingless Laser Wakefield Acceleration, Phys. Rev. Lett. 124, 134802 (2020)

[220] La détection des quarks au sein du proton remonte à la fin des années 1960. Elle a été réalisée par une collaboration menée par deux physiciens américains Jérôme I. Friedman, Henry W. Kendall, et un physicien

décrite par une théorie de la mécanique quantique : le modèle standard. Selon ce modèle, les particules sont soit élémentaires comme les leptons et les bosons, soit composites ; le nombre total de particules élémentaires connues, dix-sept, est illustré par le tableau synthétique ci-dessous.

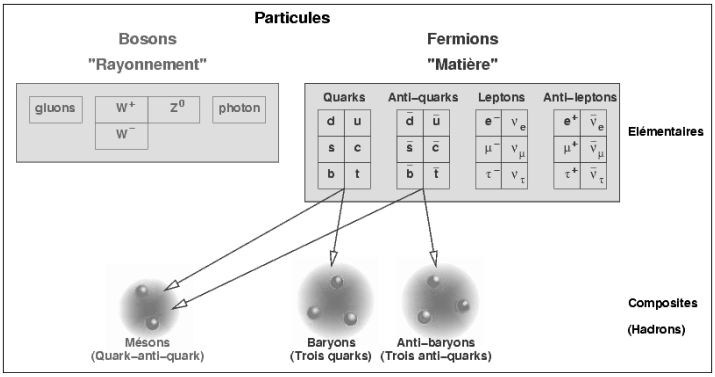

Figure 10 : Les différentes particules élémentaires selon le modèle standard

Selon ce modèle, les particules sont composées de deux ou trois quarks (la question de particules constituées de plus de trois quarks est à ce jour ouverte). La masse cumulée des quarks ne représente qu'environ 5% de la masse totale de la particule hôte, le reste résultant des interactions de liaisons entre ces quarks dont les gluons sont responsables. La nature corpusculaire de ces quarks a été mise en évidence empiriquement.

Un noyau d'atomes de matière constituant notre Univers comporte deux types de particules : les neutrons et les protons. Si l'on mesure la masse totale d'un noyau atomique la valeur obtenue est toujours inférieure à la somme des masses élémentaires. Ce défaut de masse est expliqué par les physiciens comme correspondant à l'énergie de liaison assurant la cohésion du noyau, celle existant entre les protons et les neutrons dénommée l'interaction forte. L'intensité de celle-ci semble varier selon le type de noyau considéré. Par conséquent l'on est fondé à établir un lien de correspondance entre le concept de masse, comme quantité de matière, avec celui d'énergie « gelée » tel que le concevait Einstein[221] par l'intermédiaire de la relation bien connue traduisant l'équivalence entre masse et énergie :

$$E = mc^2$$

La question sous-jacente à cette interprétation de la masse est la nature de cette énergie de liaison entre protons et neutrons : se traduit-elle uniquement par une déformation de l'espace-temps ou est-elle d'un autre type ? Une autre question, liée à la précédente porte sur le lien entre le concept de masse et la nature de l'espace-temps considéré comme substantiel. On voit au travers de ses interrogations la difficulté à appréhender le concept de masse malgré l'hypothèse du champ de Higgs et la détection du boson de Higgs expliquant la masse des bosons de l'interaction faible W^0, W^- et W^+. La difficulté de compréhension, de représentation mentale, inhérente au concept de masse, explique en partie le temps mis par les organismes de décision régissant le SI pour choisir et valider une nouvelle définition du kilogramme, passant de la masse d'un cylindre métallique de référence à une définition théorique définissant ce kilogramme comme une fonction de la constante de Planck h.

Nature de la masse et son implication sur l'unité du kilogramme

Le kilogramme est l'unité de masse. La masse est une caractéristique principale de la matière, mais n'est pas un objet ; les particules sont des objets, la masse est une grandeur liée à

canadien Richard E. Taylor ; Don Lincoln, 2013, la vie interne des quarks, Journal Pour la Science, n° 428 de juin 2013

[221] Einstein A, 1905, « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », dans Annalen der Physik, vol. 322, no 10, 26 septembre 1905, p. 891-921

ces objets, une simple caractéristique. Elle est responsable de l'apparition de la force de réaction à un changement de vitesse, la force d'inertie, donc de la masse inertielle, que nous attribuons également à la réaction de freinage du vide[222]. Ainsi, la masse n'est pas une grandeur que nous pouvons facilement nous représenter par une image mentale, d'où la difficulté de la relier à une constante fondamentale particulière. Alors, qu'est-ce qu'une masse ? Poser cette question c'est ouvrir la boîte de Pandore sur la nature de la matière et sa représentation par les physiciens en tant qu'onde ou particule selon le contexte empirique considéré, ou par un champ quantique dans le cadre de la théorie quantique des champs (QFT). Car qu'est-ce que la masse si ce n'est une simple caractéristique de la matière. La masse n'est pas une quantité matérielle mais une caractéristique, une qualité, attachée à une quantité de substance, la matière, qui compose les différentes particules élémentaires. On ne peut définir la nature de la masse d'un objet que par l'interaction de la matière composée de particules élémentaires assemblées sous la forme d'objets que nous qualifions de matériels avec le milieu ambiant, le vide-espace-temps. La question centrale pour définir la masse est donc qu'est-ce que la matière ; mais nul ne sait répondre à cette question dans l'état actuel de nos connaissances.

La question de la nature et de l'origine de la matière n'est pas récente. Henri Poincaré, écrit dans un de ses plus célèbres ouvrages[223], au début du siècle :

"Souvent on va plus loin et l'on regarde l'éther comme la seule matière primitive ou même comme la seule matière véritable. Les plus modérés considèrent la matière vulgaire comme de l'éther condensé, ce qui n'a rien de choquant ; mais d'autres en réduisent encore plus l'importance et n'y voient plus que le lieu géométrique des singularités de l'éther. Par exemple, pour Lord Kelvin, ce que nous appelons matière n'est que le lieu des points où l'éther est animé de mouvements tourbillonnaires ; Pour Riemann, c'était le lieu des points où l'éther est constamment détruit ; pour d'autres auteurs plus récents, Wiechert ou Larmor, c'est le lieu des points où l'éther subit une sorte de torsion d'une nature toute particulière."

Si les observations et les mesures vont très vite infirmer les hypothèses de Kelvin, la théorie de la relativité introduite par Einstein va confirmer l'intuition de Poincaré sur le lien entre matière et l'espace-temps qu'Einstein, nous l'avons vu, n'a pas hésité à assimiler à la nouvelle conception de l'éther, mais soumis à deux restrictions :

Il est sans structure,

Il est d'énergie moyenne nulle

Mais cette théorie s'oppose sur cette représentation de la matière avec la mécanique quantique née dans ces mêmes années du début du 20ème siècle avec la découverte de la constante de Planck, la quantification de l'énergie et la nature probabiliste de toute mesure dans le monde microscopique. C'est ainsi que Langevin écrit :

« Pour la lumière, si l'énergie est transportée d'un seul tenant par le photon, celui-ci n'est pas une bille (...). De même, l'électron n'est pas une boule dure. » ; (Lochak, Diner et Fargue[224] dans « L'objet quantique »)

« Les particules ne sont pas des objets identifiables. (...) Elles pourraient être considérées comme des événements de nature explosive (...) On ne peut pas arriver – ni dans le cas de la lumière ni dans celui des rayons cathodiques - à comprendre ces phénomènes au moyen du concept de corpuscule isolé, individuel doué d'une existence permanente. (...) La meilleure connaissance possible d'un ensemble n'inclut pas nécessairement la meilleure connaissance possible de chacune de ses parties. (...) Selon la vieille conception leur individualité (des particules et des atomes) était basée sur l'identité des matériaux dont elles sont faites. (...) Dans la nouvelle conception, ce qui est permanent dans ces particules élémentaires sous ces petits

[222] Gravity probe B, 2011, Final results of a space experiment to test general relativity. *Physical Review Letters*. 2011-05-01. Retrieved 2011-05-06.

[223] Poincaré H., 1902, La science et l'hypothèse, Ernest Flammarion Paris, p. 198

[224] Lochak G., Diner S., Fargue D., 1993, L'objet quantique, Flammarion

agrégats, c'est leur forme ou leur organisation. » ; (Erwin Schrödinger dans « Physique quantique et représentation du monde »)

« On ne compte pas les électrons ou les photons comme on compte les objets que nous rencontrons autour de nous. » ; (Georges Lochak, Simon Diner et Daniel Fargue dans « L'objet quantique ».)

« Si un électron entre et sort d'une boîte (une zone par exemple) (...), on ne peut pas dire que c'est le même électron qui entre et qui sort. (...) 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 ? (...) 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. » ; Jean-Marc Lévy-Leblond dans « La quantique à grande échelle », article de l'ouvrage collectif « Le monde quantique »

La théorie qui décrit le comportement de ces particules, leurs caractéristiques est le modèle standard. Cette théorie, bien que permettant des prédictions de mesure avec une grande précision, échoue sur plusieurs questions comme par exemple la prédiction de particules supersymétriques jamais détectées malgré tous les efforts des scientifiques depuis près de quarante ans.

Soyons un peu plus précis : nous n'avons accès à la mesure de la masse que de façon indirecte en mesurant son interaction avec le milieu ambiant, en évaluant l'intensité de la force résultant de la gravitation. Deux théories s'affrontent actuellement pour donner une interprétation de la masse et de son effet, la gravitation, que nous traduisons dans la vie quotidienne comme la force de pesanteur car résultant de l'action de la Terre sur nos objets de la vie courante. En pratique nous ne mesurons pas la quantité de matière mais plutôt l'interaction de la quantité de matière contenues dans un objet donné avec celle constituant l'objet Terre. Ces deux théories qui tentent de nous fournir une explication sur ce phénomène d'interaction gravitationnel sont la théorie de la relativité générale initiée par Einstein en 1915 et la gravitation quantique à boucles, proche de la théorie de la mécanique quantique, mais s'en distinguant fortement notamment par l'absence de la variable temps dans sa modélisation mathématique.

Selon la théorie de la relativité générale, l'Univers est essentiellement continu et nous devons considérer que tous les éléments de cet Univers accessible à nos sens, celui de la matière et de la lumière principalement, baigne dans un espace déformable, le vide-espace-temps, « le mollusque » comme aimait à l'appeler Einstein. Dans le cadre de ce modèle, en réalisant la mesure d'une masse par un dispositif physique, reposant par exemple sur le principe des balances, nous mesurons la courbure de l'espace-temps en un point particulier. Nous ne mesurons pas la quantité de matière présente localement mais seulement sa capacité à déformer localement cet espace-temps qui ainsi peut être décrit comme une substance. La gravité, selon la relativité d'Einstein, est fonction de la courbure de l'espace-temps au point ou est fait la mesure de la force d'interaction gravitationnelle. Une modification imprévue de la gravité, même transitoire, va entraîner une erreur sur la masse déduite de la mesure de la force de gravitation résultante. Mesurer une masse en utilisant un dispositif fondé sur le principe de la balance pose donc la question de la fiabilité du résultat de la mesure réalisée. Si maintenant nous considérons le point de vue de la relativité, la masse n'existe que par la gravitation et l'inertie. La première est liée à la courbure de l'espace-temps comme nous l'avons vu précédemment, la seconde pourrait être un effet du « freinage » d'un corps accéléré dans le vide, ce dernier agissant comme une force de frottement mais qui ne se manifesterait que pour des accélérations non nulles, un peu comme un fluide parfait. Einstein explique que l'inertie est liée à la structure même de l'espace-temps ; selon lui, c'est cette dernière qui en est responsable,

dépassant ainsi les idées antérieures de Mach[225] qui, lui, pensait que seule la totalité des masses de l'Univers étaient la cause de l'inertie.

« Peut-être devrions-nous construire toute une mécanique nouvelle que nous ne faisons qu'entrevoir, où l'inertie croissant avec la vitesse, la vitesse de la lumière deviendrait une limite infranchissable. La mécanique vulgaire, plus simple, resterait une première approximation puisqu'elle serait vraie pour les vitesses qui ne seraient pas très grandes, de sorte qu'on retrouverait encore l'ancienne dynamique sous la nouvelle. »

L'espace-temps utilisé par la théorie de la relativité restreinte suppose que tous les objets soient de masse nulle, ce qui ne correspond manifestement pas à notre perception de la réalité. L'action gravitationnelle se trouve par conséquent exclue de cette nouvelle conception du monde rendant la théorie de la relativité restreinte incomplète. C'est la relativité générale qui va la compléter en incluant à la relativité restreinte une explication de la gravitation par l'introduction d'une métrique courbe dans la représentation de l'espace-temps, celle de Riemann, conférant au vide une réalité et une substantialité qu'il avait perdu avec la seule relativité restreinte[226], théorie selon laquelle le vide ne contenait rien et le concept d'éther était récusé[227].

Einstein définit la gravitation, à laquelle est soumise un corps dans un repère d'observation, comme équivalente à une accélération communiquée à ce corps, dont la cause est l'énergie potentielle induite par la courbure de l'espace-temps, avec une valeur telle que la force résultante à laquelle le corps est soumis, soit équivalente à la force newtonienne de gravitation. Si par exemple un observateur est enfermé dans une cage sans fenêtre, posée sur le sol, il va pouvoir conclure qu'il est immobile à la surface de la terre en réalisant plusieurs expériences simples comme par exemple l'observation de la chute d'un corps avec et sans vitesse initiale. Cet observateur va en déduire l'accélération de la pesanteur à laquelle il est lui-même soumis. Si par contre, dans un second temps, alors que la personne enfermée est endormie, cette cage est emmenée dans une fusée loin de toute planète et est soumise à une accélération constante de telle manière que celle-ci soit égale à celle perçue à la surface de la Terre du fait de la pesanteur, alors notre observateur, lorsqu'il va se réveiller dans cette situation, ne pourra pas conclure qu'il a changé d'état ; pour lui la cage sera toujours à la surface de la terre. C'est cette équivalence entre gravitation et accélération qui permet de comprendre l'effet de courbure de la trajectoire d'un rayon lumineux passant à proximité immédiate d'un corps massique comme une étoile ou un trou noir. Cette courbure de l'espace-temps est imperceptible par notre système sensoriel et accessible à nos dispositifs de mesure que de manière indirecte, par exemple la détection des effets engendrés par la propagation des ondes gravitationnelles.

Mais cette nouvelle définition de la gravitation n'est pas suffisante, il faut définir la nature de l'espace dans lequel elle peut s'appliquer. Dans son article de 1915[228], Einstein, donne une nouvelle description de la relation entre l'espace, temps et matière. Il redéfinit l'espace comme un espace à quatre dimensions obéissant aux lois des espaces de Riemann. On parle alors d'une variété de dimension quatre qui est un espace topologique dans lequel un événement est représenté par quatre nombres représentant la position spatiale et temporelle.

---

[225] Mach E., 1904, La mécanique - Exposé et critique de son développement, Traduit sur la quatrième édition allemande par Émile Bertrand Introduction de Émile Picard *Paris, Librairie Scientifique A. Hermann*

[226] Einstein A. 1905, "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" [Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?], Annalen der Physik, Hoboken, NJ (published 10 March 2006), 323 (13), pp. 639–641

[227] Einstein, Albert, 1905d [Manuscript received: 30 June 1905], written at Berne, Switzerland, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" [On the Electrodynamics of Moving Bodies], Annalen der Physik (Berlin), Hoboken, NJ (published 10 March 2006), 322 (10), pp. 891–921

[228] Einstein, Albert, 1915, [Published 25 November 1915], "Die Feldgleichungen der Gravitation" [The Field Equations of Gravitation], Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (in German), Berlin, Germany, pp. 844–847

Il avance ensuite l'hypothèse que la présence d'une densité de masse, ou d'énergie, dans un volume donné, va déformer l'espace-temps en le courbant à la manière d'une boule posée sur une nappe tendue[229]. C'est cette déformation qui est responsable de l'effet de gravitation, un premier objet de faible masse situé à proximité de la déformation espace-temps causé par une seconde masse importante (une étoile) va avoir tendance à « tomber » dans le puits de potentiel ainsi créé. Pour justifier cette courbure de l'espace-temps sous l'effet d'une masse, Einstein va introduire, par hypothèse, une relation entre la géométrie de cet espace-temps et une distribution spatiale de masse ou d'énergie. Travaillant dans des espaces à quatre dimensions, il définit ainsi un premier tenseur $G_{\alpha\beta}$ (les indices α, β étant des indices se référant aux dimensions de l'espace-temps et pouvant prendre une valeur entre un et quatre[230]) représentant la structure de l'espace-temps en chaque point, sa topologie, et un second tenseur $T_{\alpha\beta}$, le tenseur énergie impulsion, qui est représentatif de la distribution spatiale des densités de masses et d'énergie, par exemple de champs électromagnétiques. Dans un repère inertiel, ce tenseur d'énergie impulsion est constant le long d'une géodésique : c'est le principe de conservation de l'énergie étendu. Dans un même référentiel un corps initialement au repos peut acquérir de la vitesse sans pour autant changer de masse, ce qui correspond à une acquisition d'énergie cinétique : la loi de conservation de l'énergie d'un corps reste valable uniquement dans les référentiels inertiels. Le tenseur énergie-impulsion étant définie par une densité de masse et/ou d'énergie électromagnétique, à l'échelle de l'Univers, en théorie cosmologique il suppose soit l'approximation d'une continuité de la matière dans l'espace, soit l'assimilation d'un ensemble de particules à un gaz de densité continue. Cette hypothèse faite par Einstein, et toujours acceptée depuis, qui permet par exemple l'assimilation du gaz galactique à un fluide et la formulation d'une solution à l'équation d'Einstein, s'avère une difficulté pour la mécanique quantique comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent. Enfin, il forme l'hypothèse, tout à fait arbitraire, que ces deux tenseurs peuvent s'égaler, à une constante dimensionnelle près, si la géométrie de l'espace-temps est bien liée uniquement à la fonction de la distribution de masses et d'énergie :

$$G_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

C'est ce que l'on appelle l'équation d'Einstein, où $R_{\alpha\beta}$ est le tenseur de Ricci qui représente un aspect de la courbure de l'espace-temps en chaque point, $g_{\alpha\beta}$ le tenseur métrique de Riemann caractérisant l'espace-temps quadri dimensionnel et R la courbure scalaire, qu'il ne faut pas confondre avec le rayon de courbure de l'Univers défini par le tenseur de Riemann. Cette équation est un ensemble de seize équations différentielles que l'on ne sait pas résoudre dans le cas général. Il faut insister sur le fait que l'égalité entre le tenseur énergie-impulsion et le tenseur de courbure de l'espace-temps n'est qu'une hypothèse formulée par Einstein. On en connaît un certain nombre de solutions particulières correspondant à des situations simples, généralement symétriques. L'équation d'Einstein conduit mathématiquement à un Univers en expansion. Pour « corriger » ce problème, Einstein, qui pensait que l'Univers n'était pas immobile mais stationnaire, a introduit une constante Λ, appelée constante cosmologique, de valeur non nulle, afin de créer une force de répulsion, donc une accélération de l'espace, qu'il va ajuster pour obtenir son Univers statique :

$$G_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

[229] Cette déformation de l'espace-temps a été vérifiée notamment par les effets de lentille gravitationnelle des galaxies massives permettant de voir un objet, situé derrière ce groupement de galaxies massives, et en principe inobservable

[230] En général on utilise les indices en lettres grecques lorsqu'ils peuvent prendre quatre valeurs correspondantes aux quatre coordonnées de l'espace-temps, et les lettre romaines pour les indices ne représentant que les trois dimensions de l'espace euclidien.

Il est possible de reformuler cette équation d'Einstein en isolant le tenseur de Ricci[231] :

$$R_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4}\left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}T\right) + g_{\alpha\beta}\Lambda$$

Dans le vide où le tenseur énergie-impulsion est identiquement nul par hypothèse, le tenseur de Ricci est également nul lorsque la constante cosmologique est nulle (Cela ne signifie pas qu'un espace sans masse est nécessairement plat, car la courbure est donnée par le tenseur de Riemann à quatre indices et non un tenseur à deux dimensions comme le tenseur de Ricci). Cela montre seulement que la constante cosmologique a une action similaire à celui du tenseur de masse-énergie et est donc liée d'une certaine manière à une énergie du vide.

Ce rappel des fondements les plus importants de la relativité générale étant fait, examinons le statut que ce cadre théorique confère au vide et à sa relation avec la matière. Dans le cadre de la relativité restreinte, le vide, comme l'indique Einstein, n'entretient aucun lien de causalité avec le monde qui nous est familier, notre Univers fait de particules et d'ondes électromagnétiques. Mais avec la théorie relativiste de la gravitation, la relativité générale, l'espace-temps est déformé par la matière : si nous considérons un espace vide de toute matière et de toute énergie électromagnétique, un espace dit de De Sitter, la topologie de l'espace-temps est plane. En introduisant une masse à l'instant t_0, nous provoquons une déformation qui va s'établir de façon non instantanée et va se propager à grande distance à la vitesse de la lumière. La courbure de l'espace-temps sous l'effet de la matière, décrit de cette façon, peut-on dire que l'apport de matière à un instant donné est la cause de la déformation de l'espace-temps ? les hypothèses formulées par Einstein nous conduisent vers cette interprétation : elles vont permettre de soutenir l'existence d'un lien causal entre la nature de l'espace-temps et celle de la matière, ces deux objets étant tous deux substantiels.

Selon la relativité générale, la masse des particules n'est pas la seule à avoir une action sur la topologie de l'espace-temps, donc sur sa courbure ; toute forme d'énergie aura le même effet. Ainsi, une énergie d'origine électromagnétique va également courber l'espace-temps. Mais cette énergie électromagnétique est décrite par la propagation de photons auxquels est associé une onde électromagnétique, c'est-à-dire composé de deux champs électriques et magnétiques orthogonaux l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation de l'onde. Un photon n'est ni une pure particule ni une pure onde électromagnétique, sa nature réelle est à la fois l'une et l'autre, elle est autre chose à mi-chemin de ces deux représentations. Cependant l'onde électromagnétique et les charges qui en sont la cause n'ont aucune interaction directe avec la masse qui porte une charge électrique nulle. Ces deux quantités déforment l'espace-temps mais n'ont pas de lien direct autorisant une action de l'un sur l'autre. Une charge électrique, immobile ou en mouvement, n'a aucune action sur une masse au repos ou animée d'une vitesse fonction du temps. Pourtant une masse au repos, comme en mouvement, va déformer l'espace-temps, entraînant une courbure d'abord locale, puis qui va se propager jusqu'à l'infini. La courbure entraînée par la présence d'un proton le sera par sa caractéristique de masse non par celle de sa charge globale résultant de celles des quarks. Mais un électron animé par exemple d'un mouvement sinusoïdal va générer une onde électromagnétique porteuse d'une certaine énergie qui elle sera la cause d'une déformation de l'espace-temps. Pourtant une charge et une masse semblent des grandeurs de natures différentes, sans interaction possible.

On peut raisonnablement se poser la question de savoir si les courbures obtenues, dont la cause est une densité de masse ou une densité d'énergie électromagnétique, sont de même importance. La relativité répond oui à cette question, n'opérant aucune distinction entre ces deux causes de la courbure de l'espace-temps, ces causes pouvant être exprimées en termes d'énergie. On sait que le champ magnétique présent dans une onde électromagnétique n'est que

[231] Gourgoulhon E., 2014, Cours de relativité générale pour le Master d'astrophysique, Université UPMC, chapitre 7 p. 167 et suivantes

la traduction de la dynamique des charges électriques qui en sont la cause. C'est pourquoi il peut être interprété comme la nature dynamique du champ électrique.

La courbure de l'espace-temps provoqué par l'énergie électromagnétique de manière totalement équivalente à celle d'une masse de même énergie pose cependant une autre question : la nature du stockage de cette énergie qui ne peut être localisée comme la masse dans un volume fini de matière. Est-ce les photons, l'onde associée ou son espace de propagation, l'espace-temps qui assure ce stockage, la physique n'apporte pas de réponse définitive à ce jour. Ce que nous savons, depuis la détection récente des ondes gravitationnelles par l'interféromètre LIGO [232] , Quelle grandeur mesurons-nous vraiment avec les amplitudes des ondes gravitationnelles. Selon les équations d'Einstein, nous mesurons la déformation de l'espace-temps, l'amplitude de ses vagues ; mais qu'est-ce que cela signifie, que représente l'amplitude d'une onde gravitationnelle ? Mesurer une telle grandeur c'est reconnaître implicitement à la fois un caractère substantiel et réel à l'espace-temps, et le transport d'énergie par cette onde décrite en termes de courbure dynamique. Mesurer une amplitude d'onde gravitationnelle ou la force de gravitation c'est faire une mesure de courbure selon une dimension spatiale ; matière et espace-temps sont intimement liés l'un à l'autre. Par conséquent, la compréhension de la nature de la masse suppose au préalable celle des « vagues » d'espace-temps que nous appelons ondes gravitationnelles.

Dans la mécanique Newtonienne la géométrie de l'espace Euclidien fait partie des lois de la nature. Avec Einstein, cela n'est plus le cas : la géométrie de l'espace-temps ne fait plus partie des lois de la nature. Rien dans les équations d'Einstein ne nous dit ce que décrit la géométrie de l'espace-temps, sa nature. Nous ne la découvrons et ne pouvons formuler des hypothèses qu'après avoir résolu ces équations pour un système donné. Les lois de la nature découlant des équations d'Einstein ne supposent pas une géométrie fixe, préexistante : c'est le principe « d'indépendance par rapport au fond ». La relativité confond vide et espace-temps comme l'a clairement expliqué Einstein[233] en 1920 :

« Pour nous résumer, nous dirons donc que l'espace est, selon la théorie de la relativité générale, doté de qualités physiques et qu'en ce sens il existe un éther. D'après la théorie de la relativité générale, un espace sans éther est impensable, car dans un tel espace non seulement la lumière ne pourrait se propager, mais aussi les règles et les horloges ne pourraient pas exister et il n'y aurait donc pas de distances spatio-temporelles au sens de la physique. Mais il ne faut pas s'imaginer cet éther comme doté de la propriété qui caractérise les milieux pondérables : être constitué de parties que l'on peut suivre au cours du temps ; on ne doit pas lui appliquer le concept de mouvement. »

Si la constante quantique de Planck, h, permet effectivement une définition réaliste de l'unité de masse, le kilogramme, elle ne traduit pas le lien que les métrologues ont cherché à lui donner, un lien entre la masse et la seule physique quantique. La masse est en effet une grandeur ambiguë de par sa compréhension dans le cadre des théories de la mécanique relativiste et de la mécanique quantique. La mécanique quantique définit la masse comme le résultat d'une interaction entre le champ décrivant toute particule avec un champ scalaire, propriété du vide qui de ce fait se trouve pourvu d'une caractéristique d'énergie non nulle. La relativité d'Einstein, elle, définit les masses comme des quantités d'énergie figées, certains n'hésitant pas à les concevoir comme des volumes d'espace-temps repliés sur eux-mêmes. La masse selon la physique quantique ne permet pas d'expliquer la gravitation mais joue un rôle important dans les processus de collisions. La masse de la relativité explique la gravité comme une déformation de la structure de l'espace-temps, les objets massiques étant alors soumis au principe de moindre action dans leurs évolutions. Ainsi le lien choisi par les métrologues et les physiciens

[232] Abbott B. P. et al., 2016, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, PRL 116, 061102

[233] Einstein A., 1920, L'éther et la théorie de la relativité, conférence

pour la définition du kilogramme n'est que le reflet de cette impossibilité à définir la véritable nature de la masse d'une particule, de tous objets en général et son lien causal avec la nature de l'espace-temps d'Einstein.

Il y a contradiction entre la définition de l'énergie, potentialité d'action sans réalité, et sa caractéristique substantielle donnée par la relation entre masse et énergie : Higgs a tenté de résoudre cette contradiction en formant l'hypothèse que la masse ne représente que le résultat de l'interaction d'une quantité d'énergie localisée dans une particule avec un champ scalaire qu'on nomme le champ de Higgs[234]. L'action de ce champ se comporte, selon lui, de façon similaire à des personnes s'agglutinant autour d'une personnalité rentrant dans une pièce, freinant ainsi son avance. Si, avec l'ensemble des physiciens, l'on admet cette interprétation de la masse en tant que simple propriété d'une particule, disjointe du concept d'énergie lié directement à la particule, il nous faut redéfinir le concept d'énergie intrinsèque d'une particule : Einstein relie l'énergie au repos d'une particule directement et uniquement à sa masse par la relation $E = m_0c^2$; cette relation signifie que l'énergie potentielle d'une particule n'est liée qu'à sa caractéristique de masse, elle-même dépendant directement du champ scalaire de Higgs. Autrement dit l'énergie d'une particule, sa masse, est une conséquence directe de son interaction avec le vide, le champ scalaire assurant le lien. Si de l'énergie est transférée à une particule par l'obtention de masse, cette énergie doit être prise d'une façon ou d'une autre au vide. Mais qu'est-ce qu'un champ scalaire : Par définition, un champ scalaire est l'attribution en chaque point de l'espace, sur lequel il existe, d'une valeur définissant une potentialité d'action sur chaque particule qui peut s'y trouver. Pour le champ scalaire attaché au boson de Higgs la potentialité d'action est une potentialité de masse. La physique moderne ne répond pas à la question de la nature de ce champ se contentant de dire que puisque le concept de champ et le formalisme mathématique associé donne une description mathématique satisfaisante du monde et font des prédictions qui sont empiriquement vérifiées, il est inutile de se poser des questions sur le pourquoi. Même en occultant la nature du champ de Higgs qui transporte d'une certaine façon de l'énergie puisqu'il est la cause de ce que l'on nomme une masse, l'équivalence entre masse et énergie ainsi que la nature profonde de cette caractéristique de masse conférée par ce champ de Higgs restent des questions ouvertes. Aucune réponse n'est proposée par la physique moderne à ces deux questions. Certains[235], peu nombreux, avancent l'idée que les particules seraient, d'une certaine façon, de l'énergie du vide « gelée » mis en réserve comme l'est l'énergie mécanique potentielle d'un réservoir d'eau situé en hauteur, d'autres que la matière pourrait se comprendre comme une déformation locale de l'espace-temps et être constituée de la même substance[236].

Mais nous pourrions également définir cette masse en utilisant la mécanique quantique, l'autre théorie qui tente de nous donner une représentation de notre Univers, un Univers entièrement quantifié dont les niveaux d'énergies ne peuvent être que discrets et dont le résultat répété d'une même mesure avec le même dispositif expérimental conduira à une distribution de résultats statistiques et non pas à une même et unique valeur. Dans le cadre de ce modèle, la caractéristique de masse acquise par la matière est la conséquence de l'interaction des particules, modélisées sous la forme d'un champ quantique, avec un champ scalaire particulier, celui de Higgs attaché à la nature même du vide quantique. Dans le cadre de cette théorie même la matière n'est qu'une illusion de substance localisée, seul le vide et les champs existent, sont

[234] Higgs P. W., 1964, Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons, Phys. Rev. Lett. 13, 508

[235] Sacquin Y., 2020, https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-quest-ce-vide-1506/page/8/;
Dugué B., 2006, https://www.agoravox.fr/actualites/technologies/article/h-e-la-matiere-n-existe-pas-tout-n-130658

[236] Esfeld M., 2012, physique et métaphysique, une introduction à la philosophie de la nature, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, paragraphes 6.2 et 8.2

réels, et interagissent les uns avec les autres construisant l'image sensoriel que nous avons de notre Univers. Là encore la masse n'est pas une quantité mais plutôt une qualité, celle décrivant le degré d'interaction des champs de matière avec le vide. Si la masse est une caractéristique purement quantique de la matière alors toute mesure ne pourra donner qu'un résultat statistique et sera ainsi entaché d'une erreur liée à la nature quantique de cette grandeur.

Sur les sept unités constituant le SI, seules le kilogramme et la mole peuvent être considérées comme des grandeurs liées à des quantités de matière :

La mole représente une quantité d'atomes ou de molécules,

L'Ampère représente un flux par seconde de charges élémentaires, par exemple des électrons,

Les cinq autres, la masse, la seconde, le kelvin, la candela et le mètre représentent des qualités associées soit à la matière soit à son contenant, le vide. Il faut ici apporter une précision sur l'unité de durée, la seconde, qu'il est difficile a priori d'attribuer à l'une de ces deux catégories : si la seconde peut se construire à partir de transition entre deux niveaux d'un même atome, elle ne peut pas être qualifié de qualité liée à la matière. Ce lien avec les niveaux énergétiques d'un atome n'est qu'une conséquence contingente de l'évolution de nos connaissances technologiques et en aucune manière le temps n'est une conséquence de l'existence de ces niveaux d'énergies. Par ailleurs, le temps est par hypothèse considéré par la relativité générale comme une dimension spatiale. Le temps est-il une grandeur continue et entièrement définie et décrite par la relativité générale ou une grandeur discontinue et ne pouvant se comprendre que dans le modèle quantique du monde ? Les débats autour de l'unification de ces deux théories et de leur incompatibilité ne nous permettent pas de répondre à cette question qui reste ouverte.

La nouvelle définition du kilogramme adoptée définitivement en 2019 repose sur la mesure de la constante fondamentale h. Ce choix ne présuppose pas que le concept de masse soit interprété comme le résultat d'une fluctuation de l'énergie du vide ; il y avait seulement nécessité pour les physiciens et métrologues de proposer une définition consensuelle à la définition de l'unité de masse. Cette mesure peut être faite en utilisant plusieurs voies technologiques, toutes reconnues par les organismes régulateurs du SI et les conférences internationales (CGPM). Les deux dispositifs utilisés à ce jour sont le comptage d'atomes dans une sphère de silicium et l'utilisation de la balance du Watt. Chacune de ces deux technologies utilisent des modules qui sont soit décrits par la mécanique classique ou relativiste soit obéissant aux lois de la mécanique quantique. Or comme nous l'avons vu, l'on constate qu'à ce jour les valeurs obtenues à partir de ces deux voies expérimentales conduisent à des résultats proches mais irréconciliables. Si cette divergence est confirmée, alors il sera nécessaire de modifier la définition du kilogramme en se fondant sur une méthodologie qui évitera l'utilisation dans un même dispositif des lois quantiques et classiques.

Le principe de la balance du Watt : l'égalité de deux forces de natures différentes

Cette balance, permettant la mesure du kilogramme et de la constante de Planck h, nous apparaît comme reposant sur l'équilibrage de deux forces de natures différentes comme nous l'avons signalé précédemment. La force de Laplace et l'interaction gravitationnelle, forces au sens Newtonien du terme, sont interprétées comme des forces comparables, mais leurs origines étant différentes, leurs natures diffèrent sensiblement.

Du côté de la balance où l'on place la masse à étalonner, la force résultante de cette action est la pesanteur, ou de façon plus précise la déformation locale de l'espace-temps qui va créer une déformation poussant la masse à se diriger vers un lieu de potentiel minimum. L'action sur la masse n'est donc pas une force de pesanteur, mais une force résultat d'une cause, la déformation locale de l'espace-temps, qui va agir sur la masse pour la déplacer vers son potentiel minimum. C'est donc une diminution d'une énergie potentielle qui va générer une

force dont la nature reste partiellement une question ouverte. Cette courbure est l'effet observé de l'ensemble des masses présentes, en l'occurrence le dispositif de mesure, la balance elle-même, et la masse dont on cherche à mesurer. La conséquence de cette interprétation est que selon la topologie de la courbure de l'espace-temps provoquée le potentiel actif sur la masse mesurée pourra présenter de légères différences.

On comprend bien que la déformation locale de l'espace-temps va être la cause de la diminution de l'énergie potentielle de la masse, mais quelle est la nature de cet énergie potentielle, quelle est son origine ? Si l'espace-temps, comme l'affirme Einstein doit avoir une densité d'énergie nulle, alors une déformation ne devrait pas avoir d'effet sur une masse à proximité. La théorie de la relativité générale ne dit rien sur cet aspect de la gravitation.

De l'autre côté de la balance se trouve la bobine de fil conducteur soumis à un champ magnétique uniforme de valeur B. là encore la nature de cette force présente une zone d'ombre. Considérons l'action du champ magnétique sur un électron constituant le courant d'intensité I circulant dans cette bobine conductrice : la force résultante est décrite théoriquement, de façon satisfaisante, par les équations de Maxwell ; mais la nature du processus physique d'interaction entre l'électron et le champ magnétique, lui, n'est décrit ni par cette théorie classique, ni par son développement quantique la théorie quantique des champs ; l'explication repose sur l'interaction entre champs quantiques, une explication purement formelle. Ce manque de description physique de la nature de cette action résulte de l'impossibilité dans laquelle se trouve le physicien de décrire la structure de l'électron dont il ne connaît que ses caractéristiques au travers de la mécanique quantique et le modèle standard qui en est une extension. Le champ magnétique est, selon la théorie électromagnétique, une conséquence de la dynamique d'un ensemble de charges électriques : un champ magnétique n'apparaît que si les charges présentes dans un conducteur sont animées d'une dynamique globale. Ainsi, la force agissant sur la bobine est une interaction entre des charges en mouvement, cause de champ magnétique, et d'autres charges de la bobine animées elles aussi d'une dynamique globalement non nulle. Si une force est générée, alors il y a transfert d'énergie entre le premier groupe de charges et le second. Quel est le vecteur de médiation de ce transfert ? La question est ouverte.

Nous savons par ailleurs qu'un faisceau de lumière, composé de photons, va transporter une énergie dont la valeur est donnée par la relation de Planck :

$$E = h\,f$$

Cette énergie doit être prise en compte dans le tenseur d'énergie entrant dans l'équation de la relativité générale qui décrit la courbure de l'espace-temps, elle-même cause du phénomène de gravitation. Si maintenant nous considérons un dispositif constitué de deux charges statiques distantes de signes opposées, elles vont générer un champ électrique reliant ces deux charges. L'effet de ce champ électrique sera une force de même intensité et même direction mais de sens opposé s'exerçant sur chacune des charges. Est-ce que l'énergie mécanique causée par ces forces, qui vont mettre en mouvement les charges, leurs transmettre de l'énergie, est responsable d'une courbure de l'espace-temps ? Si cela est le cas, alors une particule électriquement neutre, mais ayant une caractéristique de masse non nulle doit se déplacer selon une géodésique défini par cette courbure de l'espace-temps. On serait amené alors à conclure que les effets gravitationnels ou électriques interagissent entre eux, ce qui n'est pas observé empiriquement. Une conséquence de cette analyse est que les champs électromagnétiques statiques ne modifient pas la courbure de l'espace-temps. Ainsi les effets mécaniques et électromagnétiques mis en jeu dans la balance du Watt sont explicables par une modification de la densité d'énergie potentielle et non par une comparaison de forces comprises au sens de la mécanique de Newton.

La balance du Watt mesure l'équilibre entre les effets de ces deux phénomènes gravitationnel et électromagnétique, mais la nature insuffisamment expliquée de ces deux types d'interaction ne nous garantit pas une linéarité mathématique de cette égalité. Si nous voulons comparer deux

masses de valeurs très proches M, sur le plateau de la balance, alors, même si la linéarité n'est pas parfaite les résultats de mesure elle sera masquée.

On oublie facilement que cette balance repose sur la mise en pratique de la théorie de la relativité générale pour les actions gravitationnelles d'une part et sur des interactions entre particules relevant, elles, de la théorie de la mécanique quantique d'autre part. Cette analyse va se trouver renforcée avec l'introduction dans le dispositif de mesure de technologies de mesures quantiques du courant circulant dans la bobine et de la tension à ses bornes. La mesure utilisant le second dispositif, celui se rattachant au nombre d'Avogadro repose sur des lois physiques différentes. Il est concevable que la mesure de la constante h par ces deux voies puisse conduire à des résultats différents si les lois sur lesquelles ils reposent sont comprises de façon incomplète, ce qui semble être la situation aujourd'hui.

Le problème de la comparaison entre masses macroscopiques et microscopiques

Nous ne disposons que de deux méthodes pour définir l'unité de masse à partir de la masse d'une particule ou d'un atome :

Nous utilisons une particule élémentaire stable et mesurable, et dans ce cas seul l'électron correspond à ce critère,

Nous utilisons un atome particulier, choisi conventionnellement, dont la masse atomique est connue empiriquement avec une précision suffisante pour être compatible avec une extrapolation au kilogramme en comptant le nombre d'atomes dans un kilogramme étalon. C'est le cas, à ce jour, pour l'atome de silicium.

La première méthode soulève la question de la mise en pratique d'une définition du kilogramme comme multiple de la masse d'une particule élémentaire. On aurait pu convenir de définir l'unité de masse par rapport à la masse d'une particule microscopique stable comme le proton par exemple comme nous l'avons étudié (§ 3.3). De ce point de vue le choix d'une particule élémentaire, non composite, semble préférable afin d'éviter toute ambiguïté sur la nature et la détermination de la masse d'une telle particule. La seule particule élémentaire, stable et mesurable directement, que nous connaissons actuellement est l'électron, les quarks ne pouvant être obtenus de façon isolée et toutes les autres particules étant constituées d'un ensemble de deux ou trois quarks. Deux éléments de mesure sont alors nécessaires : la mesure de la masse d'un électron avec une précision suffisante, et la détermination du nombre d'électron nécessaires pour représenter une masse globale d'un kilogramme. Une température nulle étant impossible à obtenir, nous ne pouvons observer et mesurer que des électrons en mouvement, donc une masse mesurée fonction de la vitesse relative à l'observateur, ce qui constitue une limite importante à la précision atteignable.

Une seconde difficulté apparaît si l'on définit le kilogramme à partir de la masse d'une particule élémentaire ou de celle d'un atome : le kilogramme est une grandeur macroscopique et la masse d'une particule ou celle d'un atome est une grandeur microscopique. Un ensemble d'un nombre très élevé de particules élémentaires ou d'atomes ne donne pas directement la masse d'un objet macroscopique. Considérons par exemple le cas d'un atome de carbone et celui d'une boule de ce même carbone correspondant à une masse d'un kilogramme. Si nous pouvons compter les atomes de carbone dans cette sphère macroscopique, nous ne pouvons pas écrire que la masse d'un atome de carbone est l'exact somme de six masses de protons, six masses de neutrons et douze masses d'électrons. Nous savons en effet que le noyau d'un atome présente une masse inférieure à la somme des masses de ces constituants considérés séparément. Cet écart appelé défaut de masse correspond à l'énergie utilisée comme énergie de liaison entre les particules constituant le noyau atomique. L'état actuel de la mécanique quantique, si elle permet de comprendre ce mécanisme de cohésion par transformation d'une fraction de la masse des constituants du noyau, ne permet pas un calcul prédictif de la valeur constatée qui ne peut être déterminée que par la mesure. Ne pouvant prédire la masse effective d'un noyau, il devient

nécessaire de compter les atomes par exemple de silicium dans la sphère de référence représentant un kilogramme. On ne peut calculer le nombre d'atomes dans un kilogramme d'un objet constitué d'un matériau donné et par conséquent la définition du kilogramme devra se fonder sur le résultat de mesures nous interdisant une compréhension complète de la chaine de phénomènes que les métrologues vont mettre en œuvre.

Des mesures quantiques associées à des mesures classiques dans la balance du Watt

La procédure de mesure de la constante h est la suivante : sur le plateau portant la masse on place une copie certifiée du kilogramme, en fait une masse correspondant à un sou multiple de ce kilogramme, que l'on va considérer comme exact par convention. Le courant I injecté dans la bobine de fil conducteur correspond à la valeur nécessaire pour que l'action du champ magnétique entraîne l'apparition d'une force électromagnétique suffisante pour équilibrer la force de gravitation de la masse d'un kilogramme. Dans une seconde phase, la masse étant enlevée, on déplace la bobine à l'aide d'un dispositif mécanique approprié conférant ainsi à celle-ci une vitesse constante v. Le déplacement de la bobine dans le champ magnétique va générer par induction une tension U aux bornes de cette bobine. La relation entre cette tension mesurée et la bobine, avec ses caractéristiques mécaniques, animée d'une vitesse constante v est entièrement définie par les équations de Maxwell. Le formalisme de ces équations permet d'écrire l'expression l'égalité des forces dans la première phase statique et la relation entre la tension et les caractéristiques de la bobine, sa vitesse v et le champ magnétique B dans la seconde phase dynamique. De ces deux relations on ne peut déduire de façon classique une valeur quelconque de la constante de Planck h. La valeur de celle-ci provient du fait qu'un système externe est utilisé pour mesurer la tension U et le courant I en utilisant deux effets purement quantiques : respectivement l'effet Josephson et l'effet Hall quantique (§ 3.3). Cet appareil de mesure quantique est rendu nécessaire à l'utilisation de la balance du Watt pour deux raisons :

On est obligé de l'ajouter pour relier la masse étalonnée à une valeur unité avec la constante h,

Ces deux phénomènes quantiques sont les seuls connus qui autorisent une précision de mesure des tensions et courant avec une précision compatible avec les objectifs affichés par les physiciens, métrologues et industriels.

Ces deux dispositifs quantiques deviennent donc partie intégrante de cette balance et vont modifier sa nature et son interprétation physique. Le dispositif obtenu par l'adjonction des systèmes de mesure des tensions et courants à partir de ces effets quantiques vont donner naissance à un autre type de balance du Watt qu'il serait préférable d'appeler balance du Watt quantique. Sans ces appareils de mesure quantiques, on ne pourrait que mesurer une masse à partir des valeurs des tensions U et courant I lues sur les voltmètres et ampèremètre. Aucun lien avec une constante fondamentale ne pourrait être fait. Ces dispositifs de mesure étant de nature différente, nous pensons qu'il faut considérer l'usage de ces appareils de mesures quantiques comme modifiant la nature de la balance du Watt. Les dispositifs de mesure de courant et de tension deviennent donc partie intégrante à cette balance en changeant l'objectif qui lui a été attribué lors de sa conception. Les deux théories mécaniques, quantiques et relativistes, sont profondément incompatibles. Les utiliser conjointement dans un même dispositif de mesure entraine une difficulté d'interprétation des valeurs numériques obtenues lors des mesures faites. La mécanique classique est déterministe et continue quand la mécanique quantique est probabiliste et discontinue par nature. Or, les mesures visent à déterminer une caractéristique macroscopique.

Nécessité technologique de deux phases successives

Le processus de détermination de la valeur de la constante h puis de celle de la masse comparée à celle de l'étalon de référence comporte, comme nous l'avons vu, deux phases successives. Deux questions se posent alors :

Pourquoi deux phases distinctes sont-elles nécessaires ? ne serait-il pas possible de modifier le dispositif pour réaliser ces deux phases de façon simultanée ?

Le fait de séparer la mesure de la constante h en deux périodes de temps successifs affecte-t-il la qualité de cette mesure ? en d'autres termes, les contraintes induites par la première phase sur le dispositif de la balance du Watt entraîne-t-il une diminution de la précision de mesure lors de la phase dynamique ?

Il semble que la réalisation simultanée des deux phases de mesure soit à ce jour hors de portée de nos connaissances technologiques et qu'ainsi la séparation de ces deux phases soit absolument nécessaire. Ce qui est certain c'est que le dispositif de la balance du Watt n'est pas dans le même état au début de la première et à celui de la seconde : des courants électriques ont modifié la structure du fil conducteur, la température moyenne du dispositif a augmenté légèrement, le mécanisme ayant été utilisé, les frottements et usures des différentes pièces mécaniques ont évolué. Ainsi les conditions ne sont pas entièrement les mêmes, de petites différences vont apparaitre, différences qui vont avoir des répercussions sur la précision du résultat de la mesure. Rapprocher les deux relations obtenues à partir de ces deux phases, réalisées selon un ordre quelconque pose donc une question : avons-nous le droit d'utiliser ces deux équations pour en extraire la relation de la constante h en fonction des paramètres du système ? Nous pensons pour ces raisons que non.

Contraintes technologiques sur le domaine de masses mesurables

Nous avons fait remarquer que la technologie utilisée par les différentes réalisations de la balance du Watt ne permettait pas l'utilisation de masses égales à un kilogramme, ce qui nécessitait la réalisation d'étalon de masses plus petites. Le raisonnement peut être étendu à la gamme mesurable par une telle balance. Pour les masses égales ou supérieures à un kilogramme la principale difficulté réside dans la réalisation d'un champ magnétique plus important tout en gardant une homogénéité acceptable au regard des objectifs de précisions demandés. Technologiquement seul des bobines supraconductrices semblent adaptées à la réalisation de telles valeurs de champs magnétiques. Mais l'utilisation de telles bobines vont induire de nombreux problèmes techniques dont l'introduction d'un fort gradient thermique dans l'ensemble du dispositif, conduisant à des erreurs mécaniques difficilement maîtrisables. Par ailleurs, pour des masses de plus petites valeurs, typiquement de l'ordre du gramme ou en dessous, il faudrait réduire les proportions du dispositif entier de la balance ce qui va conduire à d'autres difficultés limitant drastiquement la précision.

On est en face du syndrome du dinosaure dont le squelette est adapté à sa taille et à sa morphologie mais qui n'aurait pas pu être de taille supérieure sans augmenter sa masse par un facteur proportionnel au cube de sa taille et les diamètres de ces os selon un facteur fonction du carré de sa taille, rendant de ce fait impossible l'existence de dinosaure beaucoup plus grand que les individus du groupe. Un raisonnement similaire s'applique pour une réduction importante des dimensions de la balance en vue de mesurer des masses de l'ordre du gramme ou inférieures. Ce même syndrome s'applique. On est ainsi conduit à voir apparaitre une segmentation de fait de notre Univers. Celle-ci isole naturellement l'homme dans un monde peuplé d'objets dont la taille est adaptée à son système de perception : ni trop grands ni trop petits. Ce déterminisme dimensionnel a des conséquences : il explique certains aspects de l'évolution technologique de notre civilisation et notre difficulté à comprendre notre Univers ou le monde microscopique, qui sont au-delà de nos échelles de pensée usuelles.

La balance du Watt n'est donc utilisable que dans un domaine de valeurs de masses assez réduit. Cette limitation repose la question de l'adéquation de la définition de l'unité de masse pour les industries utilisant des masses de grandeurs microscopiques. La solution proposée par certains physiciens comme Bordé[237] repose sur la détermination du rapport h/m par une méthodologie d'interférence optique, une mesure de phases, la valeur de la constante h ayant été au préalable déterminé empiriquement et fixée conventionnellement, ce qui est le cas depuis la 26ème CGPM de novembre 2018. L'avantage d'une telle méthodologie est de pouvoir disposer de deux dispositifs de mesure pour les masses selon le domaine auquel elles appartiennent, l'inconvénient est que les dispositifs mis en œuvre relevant de théories physiques différentes la validité entre ces différentes mesures requièrent au préalable une procédure de validation de la cohérence entre les résultats obtenus compte tenu des questions soulevées plus haut relatives à la mesure de la constante de Planck h. Il est nécessaire notamment de vérifier la correspondance des valeurs de cette constante de Planck h obtenue par toutes ces différentes méthodologies, ce qui n'est pas encore le cas semble-t-il aujourd'hui.

La seconde question que nous devons examiner sur cette balance du Watt est le dispositif de mesure quantique de la mesure du courant I et de la tension U à partir de deux effets mettant en jeu un rapport du type $\frac{e^n}{h^m}$, où n et m sont deux nombres entiers positifs. L'utilisation de dispositifs mettant en œuvre les phénomènes de l'effet Josephson et Hall quantique repose sur la mesure et la détermination conventionnelle préalable de la valeur numérique des constantes fondamentales e, la charge de l'électron conjointement avec h, la constante de Planck. Ainsi dans la balance du Watt, la mesure de h est déduite de la mesure de la charge de l'électron e et d'une masse du kilogramme de référence, le grand K ou l'une de ses copies. La seconde méthode possible utilise, elle, pour déterminer cette même valeur de la constante h la mesure du rapport h/m par une méthode d'interférométrie et la connaissance de la masse m de la particule ou de la molécule utilisée. Deux méthodologies, deux contraintes différentes.

La comparaison des valeurs de la constante h obtenues à partir de ces deux méthodes pourrait conduire à des valeurs numériques a priori différentes si un biais existait dans l'une des deux méthodes choisies ou si les processus de mesures associés à la détermination de la constante e ou de la masse au dénominateur du rapport h/m mettent en jeu des phénomènes physiques non encore compris par les théories existantes (la mesure du diamètre du proton, dont nous avons déjà mentionné la divergence des valeurs obtenues, est un exemple des difficultés pouvant être rencontrées).

Sur la différence entre un acte de mesure d'objets quantique et classique

Qu'est-ce qu'un acte de mesure en physique ? Selon Campbell, l'acte de mesure est le processus par lequel un nombre va être assigné à une qualité d'un objet ; l'objet de la mesure est de rendre possible l'utilisation du pouvoir des mathématiques dans les sciences physiques[238]. Mais cette définition ne peut pas s'appliquer à une mesure quantique qui par nature ne retournera pas la même valeur numérique à la même procédure de mesure d'un même phénomène : la valeur retournée obéira à une loi de probabilité selon une répartition bien définie, par exemple gaussienne. Le résultat de l'acte de mesure d'une quantité macroscopique n'est en fait que la moyenne d'un grand nombre de valeurs quantifiée retournée simultanément par les différentes parties de l'objet de la mesure. Définir ce qu'est une mesure selon la mécanique classique, relativiste ou non et en accord avec la mécanique quantique n'est pas

[237] Bordé C., novembre 2018, Entretien privé

[238] Campbell N. R., 1957, Foundations of Sciences, The Philosophy of Theory and Experiment, part II, pp. 267 - 268

simple. Dans le premier cas, on peut penser que c'est simplement le fait qu'une valeur d'une grandeur physique particulière soit enregistrée par un dispositif technique conçu pour la mesure, et ceci indépendamment de l'observateur qui va se limiter à noter le résultat de cette mesure ; il sera donc un témoin sans participation à l'acte de mesure et les valeurs enregistrées seront entièrement définies et déterminées par le phénomène physique mesuré par l'observateur.

Le formalisme de la mécanique quantique et les postulats sur lesquels elle repose, ne permet pas de penser que la valeur qui sera enregistrée était préexistante, déterminée juste avant l'acte de mesure réalisé sur le phénomène étudié. Ce formalisme ne permet également pas de comprendre comment et pourquoi l'interaction de l'observateur avec le dispositif de mesure et le phénomène physique mesuré va conduire à cette valeur numérique particulière qui est l'une de celles possibles selon cette théorie. Cette théorie explique cette situation en affirmant que tous les états possibles de l'objet mesuré sont intriqués avec celui de l'observateur au moment de l'acte de mesure.

Selon l'interprétation de Copenhague, l'objet mesuré est microscopique quand le dispositif de mesure est macroscopique ; la mécanique quantique s'applique dans le premier cas, pas dans le second. Les physiciens pensent majoritairement que cette explication positiviste est artificielle et doit être corrigée.

« La naissance de la mécanique quantique, dans les années 1920 à 1930, ne s'est pas faite sans douleur. L'étrangeté de ses lois avait suscité parmi les physiciens de vifs débats sur la nature de cette théorie et sur la réalité physique qu'elle est censée décrire. Une interprétation a fini par s'imposer, sous l'impulsion notamment du Danois Niels Bohr : c'était l'interprétation de Copenhague, dite aussi orthodoxe. Cette interprétation a régné pendant plus de cinquante ans, mais elle n'en laissait pas moins un arrière-gout d'insatisfaction. Et depuis quelques années, à la faveur du renouveau des réflexions sur les fondements de la physique quantique, cette insatisfaction gagne du terrain. La principale pierre d'achoppement concerne la notion de mesure et le rôle de l'observateur (…). En fait, la question de ce qu'est exactement une mesure constitue un angle mort de la mécanique quantique. Du coup, l'idée que cette dernière donne de la réalité reste aussi contre intuitive que problématique. »[239]

Dans les années 1950, les physiciens ont estimés que l'origine principale de cette difficulté reposait sur le phénomène de réduction de la fonction d'onde. Plusieurs solutions ont alors été avancées :

Réduction de la fonction d'onde par la seule conscience de l'observateur,

Réduction de la fonction d'onde par l'interaction avec tout objet macroscopique suffisant pour perturber cet état instable de la superposition,

Duplication du monde en autant de mondes différents possibles qu'il existe de résultats possibles pour la mesure.

Cette prolifération de tentatives d'explications à la question laissée ouverte par l'interprétation de Copenhague a engendré plutôt la confusion que l'émergence d'une réponse satisfaisante. Récemment deux conceptions de la mesure d'un phénomène quantique sont privilégiées : le solipsisme convivial et l'interprétation de De Broglie-Bohm.

Pour le solipsisme convivial[240], une mesure n'est pas un acte physique mais perceptif. L'état du système mesuré n'est pas modifié par la mesure. Il n'y a donc pas réduction du paquet d'ondes. Le résultat obtenu par l'observateur n'est que le résultat de sa perception propre ; tout se passe comme si le vecteur d'état, porteur de toutes les valeurs possibles, était projeté sur l'une de ses composantes particulières, celle qui serait perçu par l'observateur. Entre d'autres termes, le processus peut se décomposer selon une suite d'opérations élémentaires :

[239] Mashaal M., 2020, La mesure une épine dans le pied quantique, Pour la Science, n°509, p. 3

[240] Zwirn H., 2016, The measurement problem : Decoherence and convivial solipsism, Foundations of Physics, vol. 46, pp. 635 - 667

La perception de l'observateur s'accroche sur l'une des valeurs possibles, l'un des états autorisés,

Cette sélection respecte la règle de Born qui permet de calculer la probabilité de cette valeur,

Une fois le système de perception accroché sur cette valeur, toutes les mesures en découlant seront conformes à cette sélection première.

Dans cette explication, le résultat de la mesure reste probabiliste et ne pourra qu'être un choix parmi un ensemble discret de valeurs quantifiées. Si nous voulons comparer cette valeur obtenue avec le résultat obtenu par un dispositif classique, donc continu, nous pourrions aboutir à une valeur située entre deux valeurs quantiques distinctes, ce qui conduirait à une dispersion irréductible.

Une seconde interprétation est celle dite de De Broglie-Bohm [241] (dBB). Dans cette interprétation, la fonction d'onde nous est cachée et ne se manifeste à nous que lors du mouvement des objets matériels. Dans l'interprétation orthodoxe, la réduction de la fonction d'onde s'opère uniquement lors de l'acte de mesure. Dans la théorie de Bohm, on suppose que les particules sont toujours localisables en un endroit particulier de l'espace. Il propose une description du monde et de ses éléments constitutifs beaucoup plus claire que celle de l'interprétation de Copenhague : les fonctions d'onde ne sont pas uniquement des objets mathématiques ; elles ont une signification physique. Bohm les traite un peu à la manière des champs de force classiques, tels que les champs gravitationnels et magnétiques. Les fonctions d'onde de la théorie de Bohm agissent sur les particules comme un champ de force classique. Elles poussent les particules de l'avant. Elles les guident le long de leur propre trajectoire. Les lois d'évolution de ces fonctions d'onde sont précisément les équations différentielles de la physique quantique, mais cette fois, elles restent applicables à toutes les situations. La théorie de Bohm introduit d'autres lois qui gouvernent la manière dont les fonctions d'onde mettent en mouvement leur particule respective. Ces lois sont entièrement déterministes. Elles permettent de calculer les positions de toutes les particules de l'univers, à un instant quelconque, ainsi que la fonction d'onde quantique complète de l'univers à cet instant, dès lors que ces positions et cette fonction d'onde quantique sont connues à un instant antérieur. L'onde dont Bohm parle est celle découverte par de Broglie[242] ; elle n'est pas de nature connue et reste une question ouverte bien que son existence ait été empiriquement prouvée.

Le formalisme et les calculs dans l'interprétation dBB sont exactement les mêmes que dans l'interprétation orthodoxe. Mais à la différence de celle-ci, l'interprétation dBB fournit une description du monde cohérente et, dans l'expérience des figures d'interférences engendrées par un faisceau de particules massiques, la fonction d'onde ne s'effondre pas lors de son impact sur l'écran. Il n'y a donc pas de problème sur le concept de mesure qui reste classique.

Il est remarquable que la plupart des physiciens soient d'accord sur la façon d'utiliser le formalisme de la mécanique quantique pour prédire et modéliser les phénomènes quantiques, se satisfassent de ce flou dans l'interprétation de cette théorie et la représentation du monde qu'il nous fournit, et ne manifestent qu'un intérêt limité aux questions conceptuelles posées par les postulats de cette théorie fondamentale.

Notre description de la réalité est-elle anthropocentrique ?

Jusqu'à une époque très récente, toutes les évolutions de nos connaissances en physique se fondaient uniquement sur l'observation de phénomènes naturels, de leurs reproductions dans l'enceint des laboratoires et sur les schémas de représentation mental que les physiciens

[241] Struyve W., 2011, Pilot-wave approaches to quantum field theory, J. Phys. Conf. Ser., vol. 306, article 012047

[242] Basdevant J. L., 2006, 12 leçons de mécanique quantique, Vuibert

pouvaient concevoir. Ce processus emprunte l'essence de nos expériences vécues depuis notre naissance dans ce monde. Même notre physiologie, notre système cérébral est le fruit d'une lente évolution, une adaptation à ce monde pour permettre à l'espèce humaine d'y vivre, de pouvoir se nourrir, se défendre contre les différentes menaces externes. Tous nos actes et nos pensées sont modelés par le système de perception sensoriel, notre unique lien avec la réalité dans laquelle nous sommes plongés.

Récemment, nous avons pris conscience qu'il existait d'autres éléments de cette réalité, éléments qui ne nous étaient pas accessibles par nos sens ou les instruments de mesure qui ont tous été conçus sur ce modèle, dans le but de les exacerber. Cette première prise de conscience a été en 2015 la découverte[243] et l'observation indirecte des ondes gravitationnelles prédites par la relativité générale d'Einstein dès 1915.

La relativité générale prédit l'existence d'ondes de déformation de l'espace-temps : les ondes gravitationnelles [244] . Elles se déplacent à la vitesse de la lumière et déforment dynamiquement l'espace-temps là où elles passent à la manière d'une vague sur l'océan. Elles sont produites par une accélération d'un système de masse ne possédant pas la symétrie sphérique et sont de très faibles amplitudes. On peut se représenter la difficulté de détecter et de mesurer les ondes gravitationnelles causées, par exemple, par la coalescence de deux trous noirs de quelques dizaines de masses solaires, comme équivalente à la comparaison de la distance Terre-Soleil avec le diamètre d'un atome.

Cette découverte et la mesure des paramètres de ce phénomène sont la première confrontation de l'homme face à des éléments de la Réalité dont sa nature ne pouvait pas le conduire à les imaginer. Il est d'ailleurs bien connu que tout physicien va s'attacher à répondre à la question du comment face à une nouvelle observation, mais jamais à celle du pourquoi les choses évoluent-elles ainsi. Il en est ainsi pour l'interprétation des résultats de mesures de la mécanique quantique et de la description du monde que cette théorie nous impose. De nombreuse questions ne sont pas analysées et restent ouvertes : par exemple, la nature de la matière et de la charge électrique, du temps, etc. Ainsi rapprocher des résultats d'actes de mesures quantiques avec ceux de mesures de la mécanique classique ne soulève pas de questions quant à la validité d'un tel rapprochement.

Il en est de même pour l'outil mathématique utilisé pour la modélisation des théories physiques et la prédiction (ou la falsification) de mesures non encore réalisées. Ces outils mathématiques sont produits par notre cerveau qui se fonde pour élaborer les axiomes fondamentaux des mathématiques sur notre représentation et notre compréhension du monde dans lequel nous sommes. Ces modèles mathématiques sont donc par essence contingents de l'esprit humain. Ils sont nécessairement imparfaits et limités comme l'a clairement démontré Gödel[245].

Le premier théorème d'incomplétude établit qu'une théorie suffisante pour y démontrer les théorèmes de base de l'arithmétique est nécessairement incomplète, au sens où il existe des énoncés qui n'y sont ni démontrables, ni réfutables (un énoncé est démontrable si on peut le déduire des axiomes de la théorie, il est réfutable si on peut déduire sa négation). On parle alors d'énoncés indécidables dans la théorie,

Le second théorème d'incomplétude est à la fois un corollaire et une formalisation d'une partie de la preuve du premier. Il traite le problème des preuves de cohérence d'une théorie : une théorie est cohérente s'il existe des énoncés qui n'y sont pas démontrables

[243] Abbott B. P. et al., 2016, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, PRL 116, 061102

[244] Taylor J. H. et Weisberg J. M., 1989, Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar 1913+16, Astrophisical Journal, 345 : 434 – 4501

[245] Nagel E., Newman J. R., Gödel K. et Girard J. Y., 1989, Le théorème de Gödel, Éditions du Seuil

Toute science est liée de façon nécessaire à notre perception, à la représentation que nous nous faisons du monde, aux différentes grandeurs et leurs organisations pour former tous les objets et êtres vivants qui composent notre Univers. Les lois physiques que nous élaborons à partir des données empiriques et d'un processus mental dans lequel rentre souvent une part d'imagination, d'hypothèses a priori, peuvent être qualifiées d'anthropocentriques. Ne pouvant nous appuyer que sur l'observation, la perception, et les capacités cognitives dont l'homme dispose, nous ne pouvons décrire notre réalité que de l'intérieur, position partagée entre réalisme et conventionnalisme.

Contingence de l'interprétation physique d'un phénomène et son implication sur la définition des unités de mesure

L'histoire a montré qu'un même phénomène pouvait recevoir une interprétation à un instant donné, puis évoluer vers une autre qui pourra être fort différente. La gravitation en constitue un exemple frappant. Suite aux différentes observations de Galilée, Newton va pouvoir formuler l'hypothèse selon laquelle la gravitation est le résultat d'une force à distance entre deux masses, la loi pouvant se modéliser mathématiquement comme une force appliquée sur chacune des deux masses, force proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnel au carré de la distance les séparant.

$$F_{12} = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Cette loi peut être qualifiée de vraie dans la mesure où elle satisfait les conditions nécessaires :

Une loi doit pouvoir être appliquée en toute circonstance et en tout lieu,

Elle doit pouvoir prédire la valeur correcte de la grandeur qu'elle décrit pour une observation future.

Mais ce critère de vérité fondé sur la compilation de toutes les données disponibles limite la validité de toute loi. Dans l'exemple de la gravitation, les valeurs mesurées relatives au mouvement orbital de Mercure autour du soleil différaient de celles obtenues par application des lois de Newton. Cette falsification pouvait conduire à deux positions souvent utilisées par les physiciens :

Une première, positiviste, qui va conduire les physiciens à modifier le modèle mathématique pour tenir compte des nouvelles données empiriques, mais sans modifier l'interprétation globale de la loi physique,

Une seconde, réaliste, qui va amener les physiciens à reconsidérer leur position explicative et à proposer un nouveau paradigme explicatif conduisant à une modélisation différente de la loi.

Dans notre exemple du phénomène de la gravitation, il pourrait être proposé une simple modification de la loi de Newton par adjonction d'un ou plusieurs termes de valeurs numériques faibles mais qui permettraient d'expliquer l'ensemble élargi des données empiriques. Cette position est utilisée par la théorie Mond[246] pour tenter d'apporter une interprétation à la cohésion des galaxies, sans présupposé d'une matière noire. Enfin, une seconde voie sera celle suivie par Einstein qui va, à la lumière de l'observation d'autres phénomènes de la nature, proposer un nouveau model explicatif, celui de l'existence d'un espace-temps et sa déformation par la présence de masses ou d'énergie. Cette nouvelle hypothèse avancée et soutenue par Einstein, hypothèse qui jusqu'à maintenant satisfait toutes les observations réalisées, n'en est pas moins contingente et de ce fait montrera un jour sa limite. Comment pourrait-il en être

[246] Gentile G., Famaey B. et de Blok W. J. G., « THINGS about MOND », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 527, 1er mars 2011, A76

autrement de déductions et de propositions interprétatives faites à partir d'une position interne au monde que nous cherchons à modéliser.

Un physicien doit chercher à identifier toutes les composantes de notre réalité, toutes les grandeurs la constituant. Il doit ensuite établir les modes d'interactions entre ces grandeurs de façon à pouvoir répondre à la question comment. Mais ce physicien est lui-même constitué d'un certain nombre de ces grandeurs, qui elles-mêmes vont constituer son système perceptif et cognitif responsable de l'énoncé et de l'explication des différents phénomènes, dont ceux à l'œuvre dans son propre corps. Il fait donc partie intégrante d'une circularité qui va lui interdire l'accès à l'ensemble de toutes les grandeurs et s'agissant de leurs interactions, à la compréhension du comment.

Le principe anthropique postule que le monde que nous connaissons d'expérience nous est intellectuellement compréhensible parce que c'est à nos concepts qu'il doit d'exister. Un rapport de dépendance mutuelle lie le monde et les concepts. II s'ensuit que l'Univers que nous observons est un monde pour l'être humain. Un monde qui n'existerait pas sans la présence de notre espèce. La science moderne est apparue avec la tentative de débarrasser le savoir de son anthropocentrisme Et pourtant, elle a d'emblée supposé qu'il était possible de comprendre par la pensée le monde qui existe indépendamment de la pensée. Comment justifier cette hypothèse ? Sans doute n'est-elle pas étrangère à la croyance selon laquelle Dieu a créé l'Univers, nous a façonnés à Son image et S'est adressé à nous dans une langue qui nous était intelligible. D'autant que les premiers fondateurs de la science moderne, un Descartes ou un Galilée par exemple, étaient convaincus que Dieu avait créé le monde conformément à des principes mathématiques. Ils se sentaient donc en droit de considérer que les mathématiques sont d'essence divine, point de vue qui conforte l'idée que cette discipline transcende en quelque sorte le langage et la logique, qui eux sont propres à l'espèce humaine. Citons à cet égard cette phrase de Galilée « Ce n'est pas dans les manuels de logique que nous apprenons à démontrer, mais dans les livres remplis de démonstrations, qui sont des ouvrages de mathématiques et non de logique'. » Remise en cause par les géométries non euclidiennes et les recherches récemment effectuées sur les fondements des mathématiques, cette façon de voir trouve sa justification dans des arguments d'ordre théologique qui sont loin de faire l'unanimité dans la communauté scientifique. Un certain nombre de physiciens continuent pourtant à la défendre, comme le montre notamment cette déclaration de Richard Feynman : « Si l'on veut étudier la nature, apprécier la nature, il est indispensable de comprendre le langage qu'elle parle. Elle ne fournit ses informations que sous une forme seulement; nous ne sommes pas assez immodestes pour exiger qu'elle en change avant de lui prêter attention H. » Le réalisme scientifique soutient que l'Univers indépendant des concepts humains nous est cependant accessible à partir justement de ces concepts (mathématiques ou autres). Bien que ce système cesse de placer l'espèce humaine au centre de l'Univers, il crédite de fait les concepts humains d'une capacité divine à comprendre l'Univers

Conclusion générale

C'est au travers de notre perception que nous percevons notre monde, que nous interagissons avec lui ; c'est également par elle que nous allons, par un acte conventionnel, identifier les différentes grandeurs et reconnaitre les dimensions primitives nécessaires et suffisantes pour construire de façon contingente un système d'unités de mesure adapté pour le mesurer.

Les deux théories physiques fondamentales, la mécanique relativiste et la mécanique quantique, fournissent chacune une représentation cohérente du monde, mais celles-ci sont différentes et irréconciliables. Donc vouloir construire un système d'unités de mesure à partir de l'une quelconque de ces théories conduira nécessairement à une erreur fondamentale. La solution choisie par les communautés scientifiques, métrologiques et industrielles, à savoir un groupe retrient de constantes physiques, les constantes fondamentales ou universelles, constitue la meilleure solution possible dans le contexte de l'état des connaissances scientifiques actuelles.

Mais une question, toujours ouverte, subsiste : quelles constantes physiques peuvent être qualifiées de fondamentales, et quelles autres d'universelles ? Le fondement de la réponse se trouve dans la classification proposée par Lévy-Leblond qui, bien que complétée, reste toujours celle qui obtient un large consensus parmi les acteurs de la définition des unités de mesure. Cette dépendance à cette classification est elle-même liée d'une part au paradigme physique dans lequel nous nous trouvons, et d'autre part à notre système de perception sensorielle qui nous contraint dans notre manière de concevoir et de définir un système d'unités de mesure primaires et des dimensions primitives associées. Dans ce débat, plusieurs constantes n'ont toujours pas obtenu un consensus sur leur statut officiellement définis : les constantes de Boltzmann k, de gravitation G, la charge électrique élémentaire e, ont un statut officiel qui, selon nous, ne correspond pas au classement reconnu des constantes physiques.

Le début du 21ème siècle dispose de technologies suffisamment adaptées pour permettre de réaliser des mesures de chacune de ces constantes choisies pour définir chaque unité de mesure du SI. Pour certaines d'entre elles il semble que des divergences apparaissent selon la technologie utilisée, ouvrant la double question de la valeur réelle de ces constantes, et la validité des théories physiques dans le contexte où elles sont mises en œuvre.

Le choix de la constante de Planck h pour définir l'unité de mesure des masses, le kilogramme ouvre plusieurs questions qui restent à ce jour ouvertes :

Contrairement aux autres unités du SI, la seule constante h n'est pas suffisante pour définir le kilogramme ; la charge électrique élémentaire e est également nécessaire, ce qui constitue un écart aux principes de base du SI,

Cette constante a la dimension d'une action dont le lien avec le concept de masse n'est pas intuitif et diffère des autres constantes et de leur unité liée,

Le concept de masse est différent des autres grandeurs primaires : une représentation mentale de la nature des deux autres unités de mesures primaires, le mètre et la seconde sont facilement concevables, ce qui n'est pas le cas du concept de masse qui reste profondément incompris. Cette difficulté transparait dans la formulation de définition du kilogramme approuvée en novembre 2018 : *« Le kilogramme, kg, est l'unité de masse ; sa valeur est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement 6,626 070 15 × 10^{-34} quand elle est exprimée en s^{-1} m^2 kg, ce qui correspond à des J s. »*[247]

[247] CGPM de novembre 2018, résolution sur la définition de l'unité de masse.

Ne disposant pas d'autres moyens de percevoir la Réalité, nous n'en percevons qu'une partie et au travers du filtre de la limitation de ces capacités perceptives. Par conséquent, les différents systèmes d'unités de mesure que nous pouvons construire ont tous un caractère contingent, conventionnel, une portée explicative limitée mais sont néanmoins nécessaire scientifiquement et socialement.

Pour échapper à ces questions ouvertes, le concept de système d'unités naturels de mesure a été imaginé par les physiciens. Mais ces systèmes nécessitent la définition préalable d'un système d'unités de mesure comportant au moins les unités primaires et les dimensions primitives nécessaires et suffisantes pour décrire complètement l'Univers. L'analyse de ces systèmes montre qu'aucun d'eux ne pourra conduire à une description de la Réalité absolue. Ces systèmes constituent une tentative de rationalisation du système d'unités de mesure mais reste inapplicable, les valeurs numériques des différentes unités restant hors de portée des technologies actuelles et des besoins de la société en général.

Les prochaines évolutions du système d'unités de mesure devront tenir compte de ces questions ouvertes tout en devant obtenir le consensus entre les différentes parties concernées par son utilisation.

Bibliographie et références

Les articles et ouvrages cités ici sont partagés en trois listes : une première correspond à la bibliographie primaire utilisée pour cette étude composée des principaux livres utilisés pour approfondir notre recherche, une seconde correspondant à la bibliographie secondaire regroupant les ouvrages consultés pour éclairer tel ou tel aspect ou concept particulier, et la troisième recensant les publications explicitement citées dans l'exposé.

Bibliographies primaire :

Arageorgis A., Earman J., and Ruetsche L. (2003), "Fulling non-uniqueness and the Unruh effect", Philosophy of Science, 70, 1

Acker A., (2005), Astronomie, Astrophysique, Dunod Science Sup

Aslangul C. (2010), *Mécanique quantique*, Collection Memento Science, Editions De Boeck.

Aristote, physique livre IV, 214 b

Basdevant J. L., (2006), 12 leçons de mécanique quantique, Vuibert

Bordag M., (1999), The Casimir Effect 50 Years Later, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore

De Broglie L., (1924), Recherches sur la théorie des quanta, Paris, (thèse de physique)

De Broglie L., (1957 – 1958), Cours professé à la Sorbonne durant l'année scolaire. (Inédit)

De Broglie L., (1952), la théorie des particules de spin ½ (électrons de Dirac), Paris Gauthier Villars

Cao et Schweber, (1993), The conceptual foundations and the philosophical aspect of renormalization theory. Synthèse. 97,33-108

Casse M. (2004), Energie noire, matière sombre, Odile Jacob Paris

Chassaing P., (1997), mécanique des fluides, Cepadues éditions, collection Polytech

Cohen-Tannoudji G., Spiro M. (1986), La Matière-Espace-Temps, La logique des particules élémentaires, Paris, Fayard le temps des sciences

Cox B. et Forshaw J., (2013), L'Univers Quantique tout ce qui peut arriver arrive, Dunod Quai des Sciences Paris

Derendinger J. P., (2008), théorie quantique des champs, Presses polytechnique Universitaires romandes.

Dirac P.A.M. (2009), *Les principes de la mécanique quantique*, traduction de la 4ème édition, Presses polytechniques et Universitaires romandes, Lausanne.

Dirac P. A. M. (1934), rapport au 7ème conseil Solvay de Physique

Einstein A. (1972), Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité, Gauthier Villars

Esfeld M., (2012), physique et métaphysique, une introduction à la philosophie de la nature, Presses polytechniques et Universitaires romandes

Feynman (1993), le cours de physique de Feynman, mécanique quantique, Interéditions

Gourgoulhon E. (2014), Cours de relativité générale, Laboratoire Univers et Théories (LUTH), CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot (Paris 7)

Gunzig E. (2008), Que faisiez-vous avant le big bang ? Paris Odile Jacob

Gunzig E. et Diner S. (1997) Le vide, Univers du tout et du rien, revue de l'Université de Bruxelles, Editions Complexe

Hladik J. (2006), Introduction à la relativité générale, éditions Ellipses

Hoffmann B. et Paty M. (1981), dans « Nouveaux voyages au pays des quanta », Seuil

Kistler M., (1999), causalité et lois de la nature, librairie philosophique édition Vrin

Le Noxaïc, (2004), Les métamorphoses du vide. Editions Belin

Pagels H., (1985), perfect symmetry: the search for a beginning of time, New York, Simon and Chuster

Perrin J., (1941), Electricité, Hermann

Poincaré H., (1904), Bulletin des sciences mathématiques de décembre

Poincaré H., (1895), la science et l'hypothèse, Paris Flammarion

Rich J. A., (2010) Cosmologie, cours et exercices corrigés d'astrophysique, Vuibert Paris

Samueli J. J., (2011), L'éther des physiciens existe-t-il ?, écrits sur l'éther ; du « Sensorium Dei » de Newton à l'éther d'Einstein et à celui de Dirac, Ellipses Paris

Saunders S. and Harvey R. Brown (1991) The philosophy of vacuum, Edition Clarendon Press Oxford

Sciama D. W., (1991), the pilosophy of vacuum, Clarendon pres, Oxford

Schlick M., (1934), les énoncés scientifiques et la réalité du monde extérieur, Paris Hermann éditeurs

Valentin L., (1989), Noyaux et Particules, modèles et symétries, Hermann éditeurs Paris

Bibliographie secondaire :

Adler, initiation à la mathématique d'aujourd'hui, OCDL Paris, 1964

Basdevant J. L., les mathématiques de la physique quantique, Vuibert, 1970

Basdevant J. L., mécanique quantique, éditions de l'école polytechnique, 2011

Bell, speackable and unspeackable in quantum mechanics, Cambridge University press, 1993

Bersini, qu'est-ce que l'émergence, ellipses, 2007

Bohm D., quantum theory, dover 1989

Bohr N., la théorie atomique et la description des phénomènes, jacques Gabay, 1993

Bohr N., physique atomique et connaissance humaine, Gonthier, 1961

Bordag, the Casimir effect 50 year later, World scientific, 1998

Born, Albert Einstein Max Born correspondance 1916-1955, seuil, 1972

Born, la théorie de la relativité d'Einstein et ses bases physiques, 2000

Burlat, l'onde et le grain, les deux versants du réel, Le Hameau, 1986

Carnap, les fondements philosophiques de la physique, Armand Colin, Paris 1973

Cohen Tannoudji, la matière espace-temps, fayard, 1990

Conseil Solvay la théorie quantique des champs, douzième conseil de physique, Stoops éditeur Bruxelles, 1961

Couteau, le grand escalier, des quarks aux galaxies, Flammarion 1992

De Broglie, les premiers congrès de physique Solvay, Albin Michel, 1951

De Broglie, mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs, Gauthier Villars 1957

De Broglie, Continu et discontinu, Albin Michel, 1949

Einstein, œuvres, 6 tomes, 1989

Einstein, Réflexions sur l'électrodynamique, l'éther, la géométrie et la relativité, Gauthier Villars 1972

Enriques, les concepts fondamentaux de la science, Flammarion Paris, 1913

Feynman, leçons sur la gravitation, odile jacob, 2002

Gondran, Mécanique quantique, et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?, éditions matériologiques, 2014

Gourgoulhon, relativité restreinte, CNRS éditions EDP sciences, 2010

Gubser, petite introduction à la théorie des cordes, dunod, 2012

Hawking S., La nature de l'espace et du temps; folio essais, 1996

Hladik, introduction à la relativité générale, ellipses, 2006

Hugolin, L'inertie, la force d'inertie leur nature physique et causale, blanchard, 1977

Husson, les quarks, ellipses, 2004

Illiopoulos, aux origines de la masse, ECP sciences 2014

Lagues, invariances d'échelle, Belin, 2008

Langevin, la notion de corpuscules et d'atomes, Hermann, 1934

Lemaitre G., la physique d'Einstein, 1996, edition stoffel

Makhlouf, théorie quantique des champs, Hermann, 2007

Marage, la naissance de la physique moderne racontée au fil des conseils Solvay, édition de l'Université de Bruxelles, 2009

Mazure, matière et antimatière, Dunod 2009

Perdijon, la matière noire : substance exotique ou effet relativiste ? Éditions désiris 2015

Perdijon, le quantique : un paradoxe de la relativité ?, éditions désiris, 2014

Perez, gravitation classique, ENSTA, 2011

Perez, théorie des champs classiques, presses de l'ENSTA, 2010

Poincare, dernières pensées, Flammarion, 1913

Rougier, la matiere et l'energie, gauthier villars, 1921
Rovelli C., sept brèves leçons de physique, odile Jacob, 2015
Samueli, le modèle standard, ellipses, 2013
Samueli, l'éther des physiciens existe-t-il ?, ellipses, 2011
Saumont, l'Univers dimensionnel, librairie scientifique Albert Blanchard Paris, 2014
Saunders, the philosophy of vaccuum, Clarendon press Oxford, 1991
Schlick, espace et temps dans la physique contemporaine, 1929, Gauthier-Villars
Schlick, les énoncés scientifiques et la réalité du monde extérieur, 1934, Hermann
Schrödinger E., mémoire sur la mécanique ondulatoire, Alcan, 1953
Spiro, la mesure espace - temps, fayard, 1986
Tonnelat M. A., la théorie du champ unifié d'Einstein, Gauthier Villars, 1955
Uzan, cosmologie primordiale, Belin, 2012
Veneziano G. gravitation, relativité, mécanique quantique : la grande synthèse est-elle proche ?, Fayard, 2005
Yiftah, constantes fondamentales des théories physiques, Paris, Gauthier-Villars, 1956
Zitoun, introduction à la physique des particules, Dunod, 2004

Références citées

Abbé Nollet, 1753, essai sur l'électricité des corps, 2 tomes, paris chez les frères Guerin

Abbott B. P. et al., 2016, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, PRL 116, 061102

Andrew E. R., A. Bradbury et R. G. Eades, « Removal of Dipolar Broadening of Nuclear Magnetic Resonance Spectra of Solids by Specimen Rotation », Nature, vol. 183, no 4678, 27 juin 1959, p. 1802-1803

Anglicus B., 1240, De proprietatibus rerum, traduction de Jean Corbechon en 1372 sous le titre le proriétaire des choses, Bibliothèque mazarine cote 181 (Postilles) 849 (4e livre des Sentences)

Antognini A. and al, 25 january 2013, Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen, p 417-420

Arndt M., Nairz O., Andreae J. V., Claudia Keller, van der Zouw G. et Zeilinger A., « Wave-particle duality of C60 », Nature, vol. 401, 1999, p. 680-682

Arndt Markus, Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw et Anton Zeilinger, « Wave-particle duality of C60 », Nature, vol. 401, 1999, p. 680-682

Aslangul C., 2008, mécanique quantique T2 pp 888 - 890

Augustin (saint), 1838, Les confessions en treize livres, trad. du latin de M. Léonce de Saporta, in : Chefsd'œuvre des pères de l'Eglise, t. 12, ch. 14 p. 453.

Avogadro, Amedeo, 1811, "Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons". Journal de Physique. 73: 58–76

Ayrton F. E., Mather T. and Smith F. E., 1908, a new current weigher and a determination of the electromotive force of the normal Weston cadmium cell, Phil. Trans. R. Soc.Lond. 207 463-544

Baker M., 2016, Is There a Reproductibility Crisis ?, Nature, vol. 533, 26 may

Barrow J. D., 1988, The world within the world, Oxford University press, Oxford, p. 322

Barrow J. D., 1991, traduction française 1994, Champs Flammarion

Barrow J. D., 2005, Les Constantes de la Nature, éditions Odile Jacob, p. 16

Basdevant J. L., 2006, 12 leçons de mécanique quantique, Vuibert, p32

Becker P., 2001, History and Progress in the accurate determination of the Avogadro constant, Rep. Prog. Phys., 64, 1945-2008

Bellinger E. P. and Dalsgaard J. D., Asteroseismic constraints on the cosmic-time variation ofthe gravitational constant from an ancient main-sequence star, arXiv:1909.06378v2 [astro-ph.SR] 12 Nov 2019

Berengut J. C. and V. V. Flambaum, 2011, Astronomical and laboratory searches for space-time variation of fundamental constants, Journal of Physics: Conference Series 264 012010

Berkeley, 1734, Aleiphron ou le petit philosophe et une nouvelle théorie de la vision, La Haye, Benjamin Gibert

Berthoud F., 1802, Histoire de la mesure du temps par les horloges, t. 1, Paris, Imprimerie de la République

Birdge R. T., 1941, A new table of values of the general physical constants, Rev. Mod. Phys., 13, 233-9

Birge R. T., 1919, the most probable value of the Planck constant h, Phys. Rev., 14, 361-8

Birge R. T., 1945, The 1944 values of certain atomic constants with particular reference to the electronic charge, Am. J. Phys., 13 63-73

Bohm D. et Krishnamunti J., 1999, les limites de la pensée, Stock

Bohm D., 1965, the special theory of relativity, W. A. Benjamin Inc, éditions française 2010, éditions Alphée, chapitre 8
Bohm D., 1989, Quantum Theory, Dover Publications, New-York
Bonse U and hart M, 1965, appl. Phys. Lett., 6 155-6
Bordé C. J. and J. L. Hall, 1974, Direct resolution of the recoil doublets using saturated absorption techniques, Bull. Amer. Phys. Soc., 19, 1196.
Bordé C. J., 2004, Académie des technologies groupe de travail sur la métrologie du futur
Bordé C. J., 2004, Métrologie fondamentale : unités de base et constantes fondamentales, C. R. Physique 5 813–820
Bordé C. J., 2007, La réforme du système d'unités Allons-nous vers une redéfinition des unités de base a partir des seules constantes fondamentales, la lettre de l'académie des sciences n°20
Bordé C. J., 2008, 5D optics for atomic clocks and gravito-inertial sensors, European Physical Journal Special Topics, 163 , 315-332
Bordé C. J., 2014, arXiv:1304.7201 et International School of Physics "Enrico Fermi" - Course on Atom Interferometry (2013)
Bordé C. J., 2015, lettre à l'académie, http://christian.j.borde.free.fr/LettreAcad_CB.pdf
Bordé C. J., 2016, congres international de la mesure, Paris ; The reform of the International System of Units (SI), Philosophical, Historical and Sociological Issues, Edited by Nadine de Courtenay, Olivier Darrigol and Oliver Schlaudt, Routledge, London, 2019
Bordé C. J., 2016, J. Gen. Phil. Sci.
Bordé C. J., Courtier N., du Burck F., Goncharov A. N., Gorlicki M., 1994, Molecular Interferometry Experiments, Physics Letters A188, 187-197.
Bordé C. J., Matter-wave interferometers: a synthetic approach, in Atom Interferometry, ed. P. Berman, Academic Press (1997).
Bordé C., 2007, la lettre de l'académie des sciences n°20
Bordé C., C.J. Ch. J. BORDÉ, A. HENRY et L. HENRY, Emission du gaz ammoniac excité par le rayonnement d'un laser à gaz carbonique, C.R. Acad. Sc. Paris, 262B, 1389-1390 (1966).
Bordé C., Courtier N., du Burck F., Goncharov A. N., Gorlicki M., 1994, Molecular Interferometry Experiments, Physics Letters A188, 187-197.
Bordé C.J., A. HENRY et L. HENRY, Emission du gaz ammoniac excité par le rayonnement d'un laser à gaz carbonique, C.R. Acad. Sc. Paris, 262B, 1389-1390 (1966).
Bordé Ch. J. and J. L. Hall, 1974, Direct resolution of the recoil doublets using saturated absorption techniques, Bull. Amer. Phys. Soc., 19, 1196.
Bouchendira R. et al., 2011, New Determination of the Fine Structure Constant and Test of the Quantum Electrodynamics, PRL 106, 080801.
Boys C. V., 1894, « on the Newtonian constant of gravitation », Nature
Bradley J., 1728, « lettre du Révérend James Bradley, professeur Savilien d'astronomie à Oxford, au Docteur Edmund Halley, Astronome Royal, se rapportant à la découverte d'un nouveau mouvement des étoiles fixes, Philosophical Transactions, V35
Bridgman P. W., 1926, Dimensional analysis, Phil. Mag., 2 § 12, 1263-1266
Browne P. F., 1975, Five-Dimensional Unified Field Theory: The source Function, Foundations of Physics, Vol. 5, No. 3
Burniston Brown G., 1941, A new treatment of the Theory of Dimensions, Pro. Physi. Soc., 53, 418-432
Campbell N. R., 1957, Foundations of Sciences, The Philosophy of Theory and Experiment, part II, pp. 267 - 268
Campbell N.R., 1928, An Account of the Principles of Measurement and calculations, London Longman Green and Co, chapter 6, pp. 77-93
Cassé M., 1993, Du vide et de la création, Éditions Odile-Jacob, Paris, p. 157.

Cavendish H. 1798, Experiments to determine the density of the Earth. *Phil. Trans. R. Soc. B* **88**, 469–526
Chalmers A. F., 1976 et 1987, Qu'est-ce que la science ? Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend, Editions La Découverte, Paris pour la traduction française
Chemla K., Shuchun G. et Lloyd G., 2004, les neuf chapitres, le classique mathématique de la Chine ancienne et ses commentaires, Dunod
Clairaut A C.., Sur les explications cartésiennes et Newtoniennes de la réfraction de la lumière, Académie Royale des Sciences (Paris), Mémoires pour 1739, 259-275.
Clar Günter & Philippe Destatte, Regional Foresight, Boosting Regional Potential, Mutual Learning Platform Regional Foresight Report, Luxembourg, European Commission, Committee of the Regions and Innovative Regions in Europe Network, 2007
Coccia E., 2010, la vie sensible, Éditions Payot & Rivages, pp 23-25
Cohen and E. R., Dumond J. M. M., 1965, Our know ledge of the physical contants of physics and chemistry in 1965, Rev. Mod. Phys., 4 538-94
Cohen E. R., Crowe K. M. et Dumond J. W. M., 1955, Fundamental Constants of Physics, Interscience Publishers, New York, p. 2
Cohen Tannoudji G., 2005, Einstein et les constantes universelles, Présentation GICOTAN, http://gicotan.club.fr
Cohen Tannoudji G., 2014, Constantes Universelles et limites du possible en physique, présentation lors de la rencontre Physique et interrogations fondamentales "La science et l'impossible" de novembre
Cohen-Tannoudji G. & Spiro M., 1986 la matière-espace-temps, chapitre 11, Fayard éditions
Cohen-Tannoudji G., 15/02/2012, la constante cosmologique, cinquième constante Universelle, conférence à la S. A. F.
Cohen-Tannoudji G., 1998, les constantes universelles, hachettes littérature, publié la première fois en 1995 dans la collection question de sciences dirigée par Dominique Lecourt, pp. 26 – 30, 63 - 64
Cohen-Tannoudji G., novembre 2004, Les constantes universelles de la physique, document présenté à la conférence CIEEIST
Cornu A., physicien.; Jean-Baptistin Baille, 1878, Sur la mesure de la densité moyenne de la Terre, Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, 1878/mars-18
Couturat L., 1905, Les principes de mathématiques, p. 98
Danjon A., 1929, la rotation de la Terre, l'astronomie p. 115
Dastur Françoise, Heidegger et la question du temps, Paris, PUF, coll. « Philosophies », 1990
Davies R., 6 april 2018, How to define the base of the revised SI from seven constants with fixed numerical values, rapport BIPM-2018/02
De Broglie L, Ondes et quanta, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 2 (Sept 1923) 507.
De Broglie L., 1923, onde et quanta, Comptes rendus de l'académie des sciences, T.177 507-510
De Broglie L., 1924, Recherches sur la théorie des quanta, Paris, (thèse de doctorat en physique)
De Broglie L., 1959, L'interpretation de la mecanique ondulatoire. J. Phys. Radium, 20 (12), pp.963-979. <10.1051/jphysrad : 019590020012096300>. <jpa-00236174>
Deaver B. S. and W. M. Fairbank, 1961, experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders, Phys. Rev. Lett. 7, 43-6
Décret du 18 Germinal, an 3, 7 avril 1795, Décret relatif aux poids et mesures (1, Bull. 135, n°749 ; B. 53, 114)
Delon P., 1979, thèse de doctorat, processus de dissociations dans les molécules diatomiques, Université Paris 6
Derendinger J. P., 2008, théorie quantique des champs pp. 47-55

Desray J., 1801, essais sur le calorique, Paris Desray
Destalles R. D., 1980, the Avogadro constant, Annu. Rev. Phys. Chem., 31, 435-61
Dingle H., 1942, On the dimensions of physical magnitudes, Phil. Mag., 33 § 220, p. 321-334
Dirac P. A. M., 1937, The Cosmological Constants, Nature, 20 février 1937, p. 323
Doll R. and M. Näbauer, 1961, proof of magnetic flux quantization in a superconducting ring, Phys. Rev. Lett. 7, 51-2
Douglas J. F., 1969, Dimensional Analysis for Engineers, Pitman, London
Ducanson W. E., 1941, The Dimensions of Physical Quantities, Proc. Phys. Soc., 53, 432-448
Duff M., 2003, JHEP 03, 023
Duhem P., 1906, la théorie physique, son objet, sa structure, 2ème édition revue et augmentée, Paris Vrin
Eddington A., 1942, the theoretical values of physical constants, proc. phys. Soc. 54, p. 491 - 504
Einstein A, 1905, « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », dans Annalen der Physik, vol. 322, no 10, 26 septembre 1905, p. 891-921
Einstein A. ,1915, Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie, Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, p. 831
Einstein A. 1905, "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" [Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?], Annalen der Physik, Hoboken, NJ (published 10 March 2006), 323 (13), pp. 639–641
Einstein A., 1905 lettre à Paul Ehrenfest et 1909, *Phys. Zeit.* 10, 192 ; Einstein A., 1909, On the development of our understanding of the nature and composition of radiation, Physikalische ZeitschriftVol. 10. No. 22, pg. 817
Einstein A., 1907, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronic IV p. 411-462 ; traduction française dans “Einstein Œuvres choisies” F. Balibar et al, Le Seuil (1999)
Einstein A., 1920, L’éther et la théorie de la relativité, conférence
Einstein A., 1980, in I. Rosenthal-Schneider, reality and scientific truth: discussions with Einstein, Von Laue and Planck, Wayne State University press, Detroit
Einstein A., 1993, *Autobiographie scientifique* (1949) in Albert Einstein, physique, philosophie, politique, textes choisis et commentés par Françoise Balibar, pp. 199-200, Le Seuil, Points
Einstein, 1916, Die grundlage der allgemeinen relativitätstheorie, annalen des physic, vol. XLIX, pp. 769-882, traduction française tirée de Albert Einstein, œuvres choisies, textes choisis par F. Balibar, O. Darrigol et B. Jech, éditions du Seuil / éditions du CNRS, 1989.
Einstein, Albert, 1915, [Published 25 November 1915], "Die Feldgleichungen der Gravitation" [The Field Equations of Gravitation], Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (in German), Berlin, Germany, pp. 844–847
Ellis B. D., 1966, Basic Concept of Measurement, Cambridge University Press, Cambridge, p. 125
Encyclopédie de la Pléiade, 1963, Histoire de la science, NRF, pp. 893-977
Esfeld M., 2012, physique et métaphysique, une introduction à la philosophie de la nature, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, paragraphes 6.2 et 8.2
Espagnat B. et Zwirn H., 2016, measurement problem : Decoherence and convivial solipsism, Foundations of Physics, vol. 46, pp. 635 - 667
Fernandez B., 2006, De l'atome au noyau : Une approche historique de la physique atomique et de la physique nucléaire, Ellipses, partie II, chap. 1
Feynman R. (11 December 1965). Nobel Lecture
Fine A., 1991, Piecemeal realism, Phil. Stud., 61, 79-96

Flambaum V. V., Chin C., Berengut J., 2015, Enhancement of the e_ects of space-time variation of the fundamental constants in collisions of cold atoms near Feshbach resonances, Journal of Physics: Conference Series **635** 022016
Fleury P., Dupuy H., Uzan J-P., 2013, Interpretation of the Hubble diagram in a nonhomogeneous Universe, Physical Review D 87, 123526
Flowers J. L., Margolis H. S. and Klein H. A., 2004, Contemp. Phys. 45, 123
Genevès G., Gournay P., Pinot P., Juncar P., Lecollinet M., Chassagne L., Clairon A., Landragin A., Holleville D., Pereira Dos Santos F., Besbes M., Alves F., Topçu S., Haddad D., Gosset A., Silvestri Z., Meury P.-A., Madec T., Macé S., 2007, Revue française de métrologie, n°9, Volume 2007-1
Gentile G., Famaey B. et de Blok W. J. G., « THINGS about MOND », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 527, 1er mars 2011, A76
Gondran M. et Gondran A., 2014, Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?, éditions Matériologistes, collection sciences et philosophie, p.60-61
Gordon J. P., Zeiger H. J. et Townes Ch. H. ; Philippe Binant, « Introduction au laser. Du point de vue de la physique », La Lettre, n° 164, Commission Supérieure Technique, Paris, 2017, p. 9-13
Gourgoulhon E., 2014, Cours de relativité générale pour le Master d'astrophysique, Université UPMC, chapitre 7 p. 167 et suivantes
Gravity Probe B, 2011, Final results of a space experiment to test general relativity. Physical Review Letters. 2011-05-01. Retrieved 2011-05-06.
Grinbaum A., 2014, *Mécanique des étreintes – Intrication quantique* – Éditions les belles lettres, collection Encre marine
Gundlach J. H. et Stephen M. Merkowitz. « Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback ». *Physical Review Letters*, 85(14):2869-2872, 2000.
Günter CLAR G. & DESTATTE P., Regional Foresight, Boosting Regional Potential, Mutual Learning Platform Regional Foresight Report, Luxembourg, European Commission, Committee of the Regions and Innovative Regions in Europe Network, 200
Hall J. L., 2011, Learning from the time and length redefinitions, and the meter demotion, phil. Trans. R. Soc. A 369, 4090-4108
Hänsch, T. W. & A. L. Schawlow (1975), « Cooling of gases by laser radiation », in Optics Comm.13, p. 68
Harris W. Snow, 1834, An X-ray interferometer, Phil. Trans. R. Soc. Lond. Part II 213-45, P212
Hecht E., 2008, Optics, Pearson
Hempel C. et Oppenheim P., 1948, Philosophy of Science, vol. 15, n°155, p. 135
Higgs P. W., 1964, Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons, Phys. Rev. Lett. 13, 508
Hilton P. A., 2002, In the Beginning…, Int. Congrs on App on Application of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'2002), Scottdales, USA
Histoire de la science, Encyclopédie de la Pléiade, 1963, NRF, pp. 893-977
Hume D., 1946 et 1983, Traité de la nature humaine, trad. A. Leroy, Bibliothèque philosophique, Aubier, Paris
J. C. Berengut and V. V. Flambaum, 2012, Manifestations of a spatial variation of fundamental constants in atomic and nuclear clocks, Oklo, meteorites, and cosmological phenomena, EPL, 97 20006
Jacomy B., 1990, Une Histoire des Techniques, éd. le Seuil
Johnstone Stoney G., 1881, on the physical units of nature, Philosophical Magazine 381

Johnstone-Stoney G.,1874, discours intitule “On the physical units of Nature”, devant l’association britannique pour l’avancement des sciences, publié dans Philosophical Magazine 381, 1881
Jonhson P., 1997, the constants of nature, Ashgate Singapore, p. 90-91
Jozeau M.-F., 1994 la mesure de la Terre au 19ème siècle, nouveaux instruments, nouvelles méthodes, in La Mesure Instruments et Philosophies, collection milieux, Champ Vallon, pp. 95 - 106
Jung C. G., 1964, Dialectique du moi et de l’inconscient, Folio Essais, Gallimard, première édition en 1933
Kaluza T., 1921, « *On the problem of unity in physics* », *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin.* (*Math. Phys.*) 966-972
Kane G., 2000, supersymétrie, les lois ultimes de la nature dévoilées, éditions le Pommier
Kastler, Alfred (1950), « Quelques suggestions concernant la production optique et la détection optique d’une inégalité de population des niveaux de quantification spatiale des atomes. Application à l’expérience de Stern et Gerlach et à la résonance magnétique », inJ. phys. radium11.6,pp. 255–265.
Keith A. Olive, Maxim Pospelov, Yong-Zhong Qian, Alain Coc4, Michel Casse, and Elisabeth Vangioni-Flam, 23 may 2002, Constraints on the Variations of the Fundamental Couplings, arXiv:hep-ph/0205269v1
Kibble B. P., 1970, « A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method », Atomic Masses and Fundamental Constants 5, edited by J. II. Sanders and A. II. Wapstra, New-York, Plenum Press, 545-551
Kibble B. P., 1976, A suggestion for a different way of realizing the ampere Atomic Masses and Fundamental Constants, vol. 5, ed J. H. Sanders and A. H. Wapstra (New York: Plenum) pp. 549-51
Klitzing K., G. Dorda and M. Pepper, 1980, New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized Hall resistance, Phys. Rev. Lett., 45 494-7
Kose V. and W. Wöger, 1986, Fundamental constants and the units of Physics, Metrologia 22, 177-185
Lachièze-Ray M., et J-P. Luminet, 1994, La physique et l'infini, Flammarion, p. 114
Lagrange J.-L., 1788, mécanique analytique, à paris chez la veuve Desaint, libraire, rue du foin St. Jacques
Laloë F., 2017, Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?, CNRS Éditions / EDP Sciences 2ème édition
Le Verrier U., 1843, *Recherches sur l'orbite de Mercure et sur ses perturbations. Détermination de la masse de Vénus et du diamètre du Soleil*, dans *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 1843, 1re série, t. 8, p. 273–359
Lecourt D. (dir.), 2006, Dictionnaire d’histoire et philosophie des sciences (1999), 4e réed. «Quadrige»/PUF
Lemaitre G., 1946, l'hypothèse de l'atome primitif, Neuchatel édition du Griffon
Levy-Leblond J. M., 1977, On The Conceptual Nature of the Physical Constants, Revista del Nuovo Cimento, 7, 187 - 206
Lévy-Leblond J. M., 1979, Problems in the Foundation of Physics, LXXII Corso Società Italiana di Fisica, Bologna, 237
Levy-Leblond J. M., 2002, Le monde est plus riche et compliqué que ne le pensent les physiciens, Journal La Recherche, n°349, pp. 87 - 89
Levy-Leblond, 1977, On the Conceptual Nature of the Physical Constants, Riv. Nuovo Cimento 7, 187-213 et The Reform of The International System of Units (SI), Phisophical, Historical and sociological Issues, Edited by Nadine de Courtenay, Olivier Darrigol and Oliver Schlaudt, History and Philosophy of Technoscience, Routledge (2019), pp. 125-149

Lewis D., philosophical papers, Vol. 2, Oxford university press (1986), p 33 - 66
Lochak G., Diner S., Fargue D., 1993, L'objet quantique, Flammarion
Luminet J.-P., Thomas Kuhn, la structure des révolutions scientifiques, éditions Champs Sciences, Flammarion, 2018, p. 38
Mach E., 1904, La mécanique - Exposé et critique de son développement, Traduit sur la quatrième édition allemande par Émile Bertrand Introduction de Émile Picard *Paris, Librairie Scientifique A. Hermann*
Maiman T. H., 1960, Stimulated Optical Radiation in Ruby, Nature,187, 493
Malherbe J. F., 1976, La philosophie de Karl Popper et le positivisme logique, Namur, Presses Universitaires de Namur, coll. « Philosophie et Lettres », 2ème éd. Revue et corrigée, Presses Universitaires de Namur et PUF, 1979
Marion H., F. Pereira Dos Santos, M. Abgrall, S. Zhang, Y. Sortais, S. Bize, I. Maksimovic, D. Calonico J. Grünert, C. Mandache,† P. Lemonde, G. Santarelli, Ph. Laurent, and A. Clairon, 31 dec. 2002, A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks, arXiv:physics/0212112v1 [physics.atom-ph]
Mashaal M., 2020, La mesure une épine dans le pied quantique, Pour la Science, n°509, p. 3
Masterman Margaret, 1970, The Nature of a Paradigm, dans I. Lakatos et A. Musgrave (eds), Criticism and the Growth of Knowledge, Cambridge, Cambridge University Press, p. 58 - 59
Maxwell J. C., 1868, Philosophical Transaction of the Royal Society, p.499
Maxwell J. C., 1870, discours inaugural de la conférence de l'Association britannique pour l'avancement des sciences
Maxwell J. C., 1870, presidential address to the British Association for the advancement of science, cite dans B. Petley, the fundamental physical constants and the frontier of measurement, Bristol, Adam Hilger, 1985, p. 15
Maxwell, 1873, A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. 1 & 2, Clarendon Press, Oxford.
Michelson A. A. and E.W. Morley, 1887, Philos. Mag. S.5, 24(151): 449-463
Minev et al, 2019, Nature, vol. 570, pp. 200 - 204
Mirowski P., 1992, science in context 5, 1 pp.165-188
Mohr P. J. et Taylor B. N., 2005, « CODATA recommended values on the fundamental physical constant and electron mass », Metrologia, 42, 431-441
Moonzur Rahman, « La balance la plus sensible au monde : peser au yoctogramme près » [archive], sur techniques-ingenieur.fr, 13 avril 2012.
Nadeau R., 1999, vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie, éditions PUF Paris
Nagel E., Newman J. R., Gödel K. et Girard J. Y., 1989, Le théorème de Gödel, Éditions du Seuil
Nollet (abbé), 1753, essai sur l'électricité des corps, 2 tomes, paris chez les frères Guerin
Ohlon R., 1967, An electrostatic method for the absolute measurement of voltage, Metrologia 3 33-7
Palacios J., 1964, Dimensional analysis, Macmillan London, p. 23
Palma et al, 2003, Physical Review D 68, 123519
Paraskevas CARACOSTAS & Ugar MULDUR, 1997, Society, The Endless Frontier, A European Vision of Research and Innovation Policies for the 21st Century, Brussels, European Commission
Parker W. H. and Simmonds M. B., Measurement of h=me using rotating superconductors, in Precision Measurement and Fundamental Constants, NBS Special Publication 243-247 (1971).
Pauli W., 1999, Physique Moderne et Philosophie, Albin Michel, p. 152
Perdijon J., 2015, La matière noire : substance exotique ou effet relativiste ?, éditions Désiris, Paris, p. 78
Petitjean P. & J.-P. Uzan, décembre 2004, la lente dérive des constantes, sciences et avenir hors-série, 141 p. 64

Petley B. W., 1983, Some of the physical assumptions which are implicit in the proposed new definition of the metre are discussed, including the mass of the photon and the constancy of the fine structure constant, Nature 303, 373
Petley B. W., 1985, The fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement, ed A. E. Bailey (Bristol: Hilger/Institute of Physics Publishing) pp 106-15
Planck M., 1900, Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung Verh. Dtsch. Phys. Ges. 2 202-4, planck M 1967 On an improvement of Wien's equation for the spectrum, The Old Quantum Theory ed D ter Haar (New York: Pergamon) p. 79
Planck M., 1959, Vorlesungen über die Theorie der Waermestrahlung ,1914, traduction Theory of heat radiation, p. 174
Planck M., 30 mars 1947, lettre à I. Rosenthal-Schneider, traduction anglaise dans I. Rosenthal-Schneider, Reality and scientific truth, Detroit, Wayne state press, 1980, p. 56-57
Poincaré H., 1902, La science et l'hypothèse, Ernest Flammarion Paris, p. 198
Poincaré L., 1909, La Physique Moderne, Paris Ernest Flammarion Éditeur, p. 2
Posidonios, cité par Klein E., Brax P. et Vanhove P., qu'est-ce que la gravité ? Le grand défi de la physique, Dunod, 2019 p. 10
Potter J. D., 1923, The Marine Chronometer. Its History and Development, London. Rééd. : London, 1971 ; reprint, Holland Press, London, 1976 ; reprint, Antique Collectors' Club Ltd, 2006.
Quinn T. J., 2000, T. Measuring big *G*. *Nature* **408**, 919–921
Quinn, T. J., 2001, Speake, C. C., Richman, S. J., Davis, R. S. & Picard, A. A new determination of *G* using two methods. *Phys. Rev. Lett*. **87**, 111101
Quinn, T. J., Parks, H. V., Speake, C. C. & Davis, R. S, 2013, Improved determination of *G* using two methods. *Phys. Rev. Lett*. **111**, 101102
Rapport - 17 mai 2004 - En 1996, le rapport de l'Académie des Sciences-CADAS intitulé "Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XXIème siècle" présentait l'état de la métrologie en France vers 1995
Reeves H., 1994, Dernières nouvelles du cosmos, Éditions du Seuil, Paris, p. 117
Rich J. A., 2010, Cosmologie, Vuibert pp. 39-46
Richardson and Compton, 1912, The photoelectric effect, phil. Mag., 24, 575-94
Robert J.-D., 1988, Approches des positions de Bernard d'Espagnat dans une incertaine réalité. Laval théologique et philosophique, 44 (1), 31–57. https://doi.org/10.7202/400358ar
Rosenthal Schneider I., 1949, in A. Einstein Philosopher Scientist, ed. Schilpp A., Tudor, New York, p. 144
Rothleitner, C. & Schlamminger, 2017, S. Measurements of the Newtonian constant of gravitation, *G*. *Rev. Sci. Instrum*. **88**, 111101
Rovelli C., 2018, L'ordre du temps, Flammarion, pp. 113 - 152
Russell B., 1912 - 1913, « On the notion of cause », Proceedings of the Aristotelician Society, vol. 15
Russell B., 1975, Problèmes de philosophie, trad. S. M. Guillemin, Payot, Paris
Rym Bouchendira, Pierre Cladé, Saïda Guellati-Khélifa, François Nez, and François Biraben, 2011, New Determination of the Fine Structure Constant and Test of the Quantum Electrodynamics, PRL 106, 080801
Sacquin Y., 2020, https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-quest-ce-vide-1506/page/8/; Dugué B., 2006, https://www.agoravox.fr/actualites/technologies/article/h-e-la-matiere-n-existe-pas-tout-n-130658
Scaligero Julius Caesar, 1557, De subtilitate, ad Cardanum, Paris
Schlamminger S, 2014, Fundamental constants: a cool way to measure big *G*. *Nature* **510**, 478–480

Simondon G., 1958, Du mode d'existence des objets techniques, édition de 2012, Aubier philosophie, pp. 21-49
Singh A., R. K. Mishra and S. Singh, 2011, Certain investigations regarding variable physical constants, Int. J. Res. Rev. Appl. Sci., 6, 18-29
Smart John Jamieson Carswell, 1959, « Can biology be an exact science? », Synthese, (repris dans Philosophy and Scientific Realism, London, Routledge, 1963, chap. 3, « Physics and biology »)
Sola J., Karimkhani E., Khodam-Mohammadi A., 2017, Higgs potential from extended Brans–Dicke theory and the time-evolution of the fundamental constants, Class. Quantum Grav. **34** 025006 (26pp)
Soulier A., 1916, Les Grandes applications de l'électricité, t. 2, Paris, Dunod (1re éd. 1896)
Steiner R., 2013, History and progress on accurate measurements of the Planck constant, Rep. Prog. Phys. 76 016101 (46pp)
Stewart I., 1992, Dieu joue-t-il aux dés?, les mathématiques du chaos, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion, p. 66
Struyve W., 2011, Pilot-wave approaches to quantum field theory, J. Phys. Conf. Ser., vol. 306, article 012047
Tal E., 2016, Making Time: A Study in the Epistemology of Measurement, Brit. J. Phil. Sci. 67, 297–335
Taylor J. H. et Weisberg J. M., 1989, Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar 1913+16, Astrophisical Journal, 345 : 434 – 4501
Teller E., 1948, On the Change of Physical Constants, phys. Rev. 73, 801
Theoblad C., Saugier B., Leroy J., Le Maire M., Gresillon D., 2006, L'Univers n'est pas sourd, Bayard , p 45
Thompson A. M. and Lampard D. G., 1956, A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance, Nature 177 ,888
Thomson J. J., 1897, Cathode rays, Philosophical Magazine, 44, 293
Thomson W., 1868, Report on electrometers and electrostatic measurements Report of the 37th Meeting of the British Association for the Advancement of Science pp 489-512
Tolman R. C., 1917, The Measurable Quantities of Physics, Phys. Rev. ,9, 237-253
Tonnelat M. A., 1971, Histoire du principe de relativité, nouvelle bibliothèque scientifique, Flammarion, p. 79-90
Troisfontaines Claude, « La temporalité de la pensée chez Descartes », Revue philosophique de Louvain, 1989, p. 5-22
Uzan J. P., 2002 30 may, arxiv: hep-ph/0205340v1
Uzan J. P., 2003, The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status, Rev. Mod. Phys., Vol. 75, No. 2
Uzan J. P., 2003, The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status, Rev. Mod. Phys., Vol. 75, No. 2
Uzan J. P., 2012, Cosmologie primordial, Belin et Barrow J. D., 1996, La Grande Théorie, collection Champs, Flammarion
Uzan J. P., juillet 2002, les constantes varient-elles ?, pour la science n°297 (rapporte une variation de α et du rapport m_e / m_p Alexandr Ivanchik et Dmitri Varshalovich, de l'Institut Ioffe, à Saint Petersburg, ainsi qu'Esther Rodriguez et Patrick Petitjean, de l'Institut d'astrophysique de Paris)
Uzan J.-P. et Lehoucq R., 2005, les constantes fondamentales, éditions Belin, pp. 33-36
Uzan J.-P., décembre 2004, les constantes fondamentales, sciences et avenir, les 3 constantes de l'Univers, Hors-série, p. 14-19.
Uzan Jean-Philippe, 2005, Que peuvent nous apprendre les constantes de la physique ?, 12ème festival d'astronomie de Fleurance, résumé de cours

Veneziano G., 2005, gravitation, relativité, mécanique quantique : la grande synthèse est-elle proche ?, Fayard
VIDAL C., La prospective territoriale dans tous ses états, Rationalités, savoirs et pratiques de la prospective (1957-2014)…, p. 214-215
Vidal Chloë, On “la prospective territorial”, representing an encounter between the principles of foresight and those of regional development, see the reference to the DATAR international conference in March 1968. Chloë Vidal, La prospective territoriale dans tous ses états, Rationalités, savoirs et pratiques de la prospective (1957-2014)…, p. 214-215
Weinberg S., « Overview of theoretical prospects for understanding the values of fundamental constants », *Phil. Trans. Soc.* London, *A **310,** 249, 1983*
Weinberg S., 1997, Le rêve d’une théorie ultime, Odile Jacob, cité dans La Recherche n°349, janvier 2002, pp. 30 - 31
Weinberg S., *Phil. Trans. R. Soc. London* A **310,** 249, 2003
Weinberge S., 2002, La physique peut-elle tout expliquer, Journal La Recherche, n°349, pp. 25 - 31
Weinheim V. C. H., 1994, Introduction of the Theory of the Integer Quantum Hall Effect, New-York
Weizsäcker, C. F. (1935), "Zur Theorie der Kernmassen". Zeitschrift für Physik (in German). 96 (7–8): 431–458
Wesson P. S., 1999, *Space-Time-Matter, Modern Kaluza-Klein Theory*, World scientific publishing, Singapore
Williams W., 1892, On the relation of the dimensions of physical Quantities to Directions of Space, Phil. Mag., 34, § 208, p. 237
Wineland, D. J. & H. Dehmelt (1975), « Proposed10^{14} $\Delta\nu < \nu$ laser fluorescence spectroscopy on TI+ mono-ion oscillator III », in Bulletin of the Americal Physical Society 20, p. 637.
Witten E., 31 Jan 2014, arXiv:1401.8048v1 [physics.hist-ph]
Yamazaki T., Shida K. and Kanno M., 1972, Absolute measurement of voltage by an electrostatic energy-changing method IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-21, 372-5
Zimmerman J. E. and J. E. Mercereau, 1965, Compton wavelength of superconducting electrons, Phys. Rev. Lett. 14, 887-888.
Zola E., 2017, Germinal, classiques Hatier
Zwirn H., 2016, The measurement problem : Decoherence and convivial solipsism, Foundations of Physics, vol. 46, pp. 635 - 667