

Du concept à l'instrument :

Petite histoire de quelques bouleversements technologiques et de leur origine conceptuelle

Jean-Claude Pissondes

jc.pissondes@iut-velizy.uvsq.fr

Adresse : IUT de Vélizy, Département Réseaux et Télécoms
10-12 Avenue de l'Europe, 78 140 Vélizy

RESUME : Notre environnement quotidien est rempli d'objets et d'instruments que certains d'entre nous manipulent avec beaucoup de dextérité : leviers en tout genre, calculateurs, téléphones et téléviseurs, instruments indiquant notre position, télescopes, microscopes et machines qui visualisent l'intérieur de notre corps. Pourtant, peu de personnes, parfois même parmi les utilisateurs spécialistes de ces outils, connaissent réellement l'origine des concepts qui sous-tendent leur fonctionnement. En effet, la naissance des grands principes de la physique se déroulent très souvent, voire toujours, dans des circonstances totalement étrangères au contexte de leur application courante. Dans cette présentation, on examinera la trajectoire de quelques grands concepts physiques, de leur contexte d'origine jusqu'à leur utilisation dans un instrument connu de la plupart d'entre nous. On se limitera volontairement aux sciences physiques et à des instruments présentés comme « modernes », complexes dans leur fonctionnement, mais considérés comme indispensables en termes de services rendus.

Le premier exemple évoqué concerne l'électromagnétisme et l'essor des communications hertziennes au début du vingtième siècle. Les exemples suivants se rapportent à la description de la matière au niveau le plus fondamental. Elle concerne les échelles ultimes et nécessite un cadre théorique aux conséquences inédites : la mécanique quantique. Le comportement ondulatoire des particules massives, introduit par Louis de Broglie, l'introduction du spin comme « qualité » intrinsèque des particules et l'existence de l'antimatière comme conséquence de l'équation de Dirac, conduiront à la possibilité de sonder et de visualiser la matière comme jamais on n'aura pu le faire sans ces concepts entièrement neufs. Enfin, on terminera avec les théories de la relativité restreinte et générale qui ont bouleversé notre façon de figurer l'espace et le temps, puis notre description de la gravitation.

Dans tous les cas, on insistera sur ce qu'il est absolument impossible de prévoir et d'anticiper : d'une part, la façon dont le concept théorique va « s'appliquer » et « s'incarner » dans tel ou tel objet et, d'autre part, l'ensemble des implications que les équations associées au concept vont nous offrir. On évoquera aussi les motivations des auteurs des concepts présentés ici, puis, on énoncera les quelques évidences qui paraissent s'imposer suite à notre présentation.

Cet exposé s'inscrit dans le cadre particulier d'un projet tuteuré destiné à des étudiants en DUT Réseaux et Télécoms, évidemment moins ambitieux que le présent article. Le but visé est d'instruire les étudiants sur les aspects des sciences qu'ils ignorent trop souvent, très polarisés par la seule utilisation des instruments qu'ils doivent savoir manier sans avoir à les ouvrir. On donnera en conclusion une liste des thèmes pouvant parfaitement s'insérer dans un projet pour des étudiants de premier cycle en sciences et nous dirons en quoi un tel travail nous semble légitime et pertinent.

Mots clés : histoire des sciences et des techniques, électromagnétisme, mécanique quantique, relativité

1 INTRODUCTION

1.1 Considérations générales

Que nous soyons en bonne santé ou soumis à des pathologies plus ou moins lourdes, nous avons recours à l'usage d'appareils censés prolonger nos aptitudes naturelles ou réparer celles qui présentent un dysfonctionnement. Le fonctionnement de ces instruments repose sur des principes physiques qui sont ignorés de la plupart d'entre nous. De plus, le cadre théorique puis, les concepts ultimes, qui sous-tendent l'utilisation d'un scanner, d'un téléphone ou d'un casse-noix, ne font pas l'objet de beaucoup de publicité. Si nous sommes un peu curieux, nous nous apercevons que le concept à la base de l'objet que nous utilisons est né et s'est développé, quasiment dans tous les cas, suite à des préoccupations totalement étrangères à ce pourquoi l'instrument est utilisé.

L'objet de cette présentation vise à faire un bref histo-

rique de quelques concepts clés de la physique qui président au fonctionnement d'instruments qui nous sont, soit très familiers, soit à qui on accorde une grande importance. Nous voulons aussi, en conclusion, énoncer un certain nombre d'évidences qui découlent de ce panorama.

On aurait pu, bien sûr, évoquer les instruments modestes qui mettent en œuvre l'utilisation de principes mécaniques tels que la statique ou la dynamique des moments chers à Archimède. Nous avons choisi d'évoquer des appareils « modernes », dont les performances dépassent de très loin nos aptitudes physiques et semblent contredire les informations données par nos sens.

Ces outils sont trop souvent présentés, y compris par des personnes ayant reçu une formation scientifique, comme une « application » de telle ou telle loi ou principe physique. On tâchera donc de bien mettre en évidence que, en réalité, une distance énorme sépare ces objets et l'engouement qu'ils suscitent, des motivations intellectuelles des physiciens, théoriciens ou expérimentateurs,

qui ont découvert les principes sur lesquels repose leur fonctionnement. Quant aux principes dont on parle, ce sont ceux totalement en amont de la chaîne des principes associés à l'instrument considéré, ceux sans lesquels celui-ci serait impensable.

1.2 Des principes, des équations et des objets

L'expression d'un « principe » en physique se traduit toujours par l'écriture d'une équation. Peut-être ce principe n'est-il rien sans l'équation qui le formalise. De plus, c'est l'équation qui porte en son sein les données quantitatives qui contraignent le fonctionnement de l'instrument, ses dimensions spatiales et ses domaines d'application. Mais les grandes équations de la physique nous donnent plus que cela. Si elles réalisent la synthèse de ce qui est connu au moment de leur formulation, elles offrent toujours de l'inattendu que la simple lecture du principe qu'elles formalisent ne pouvait prévoir. Enfin, elles conduisent parfois à des pans entièrement neufs de la physique. Dans chaque partie de ce texte, on écrira donc les principales équations associées au concept qui sous-tend le fonctionnement de l'instrument concerné. On évoquera autant que possible les inattendus qu'elles impliquent. Les relations mathématiques mentionnées seront suivies de l'image de l'instrument dans lequel elles s'incarnent et réalisent leurs prédictions. Quelques dates clés seront données en guise de repère historique.

2 DE LA NATURE DE LA LUMIERE AUX COMMUNICATIONS HERTZIENNES

2.1 Des phénomènes électriques et magnétiques à la lumière

Après les énormes succès des théories newtoniennes concernant la mécanique et les mouvements des corps célestes enfin déchiffrés, les savants des 18^{ème} et 19^{ème} siècles sont confrontés à d'autres interrogations. La plupart d'entre elles portent sur les phénomènes électriques et magnétiques et la description de la lumière qui occupent l'esprit et le temps de beaucoup d'entre eux : Newton lui-même décrira le comportement de la lumière par des schémas théoriques difficiles et Huygens défendra une description ondulatoire sans pouvoir réellement l'imposer face à Newton. Fresnel réussira, lui, à mettre clairement en évidence le caractère ondulatoire de la lumière, puis Laplace, Ampère, Gauss et Oersted contribueront à décrire certains aspects des phénomènes électriques et magnétiques. Mais ce sont Faraday et Maxwell qui introduisent les concepts indispensables à la découverte de la nature de la lumière : la notion de ligne de force, puis, plus généralement, de « champ » permettra de synthétiser et de formaliser les phénomènes électromagnétiques. Les équations indiqueront, gratuitement, qu'une perturbation du champ électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière...

James Clerk Maxwell, qui meurt en 1879, formule l'ensemble des équations qui portent son nom dans plusieurs écrits, en particulier dans son traité d'électricité et de magnétisme, à partir de 1864. Désirant faire la synthèse des différentes caractéristiques connues de l'électricité et du magnétisme, il imagine l'ensemble

des « mécanismes » qui rendent compte de l'interdépendance de ces phénomènes. Ces mécanismes donnent lieu à des équations dont on déduit les théorèmes déjà connus... et bien d'autres choses encore. Exprimées sous la forme moderne héritée de Gibbs et Heaviside, les équations de Maxwell s'écrivent

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1b)$$

Une combinaison judicieuse de ces relations écrites dans le vide conduit, pour le champ électrique comme pour le champ magnétique, à la relation :

$$\Delta \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

On y reconnaît, par sa forme même, une équation de propagation des ondes dont la « célérité » est donnée par $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$. Un simple calcul (on mesure ϵ_0 et μ_0 au mieux...) et un ensemble d'expériences sur la vitesse de la lumière, certes difficiles à réaliser, permettront d'envisager une passerelle explicite entre deux domaines jusque là bien distincts – malgré les intuitions de Faraday –, l'électromagnétisme et l'optique.

2.2 Qu'a connu Hertz des ondes hertziennes ?

Heinrich Hertz vit entre 1857 et 1894. Très vite, son but est d'apporter la confirmation expérimentale des théories de Maxwell. Les expériences qui mettent en évidence la nature électromagnétique de la lumière sont réalisées entre 1886 et 1888. Que s'agit-il de montrer ? Qu'une perturbation du champ électromagnétique en un point de l'espace donne lieu à la propagation d'une onde ayant les caractéristiques connues de la lumière. Hertz construit de petits « résonateurs » en forme d'anneaux ouverts aux bornes desquels une tension induite par le champ magnétique variable apparaît s'ils sont orientés correctement. Il monte un dispositif où figurent un « éclateur », source d'une perturbation électromagnétique, et une plaque réfléchissante. Suite à des décharges périodiques au niveau de l'éclateur, une onde se propage, est réfléchiée par la plaque et donne lieu à un système d'ondes stationnaires. Les positions des nœuds et des ventres sont reliées à la longueur d'onde et conduisent à la célérité de l'onde via la fréquence de l'oscillateur. La vitesse ainsi mesurée semble bien être la vitesse de la lumière. Hertz disparaît trop tôt pour avoir vu et pu prévoir la moindre application de ses dispositifs.

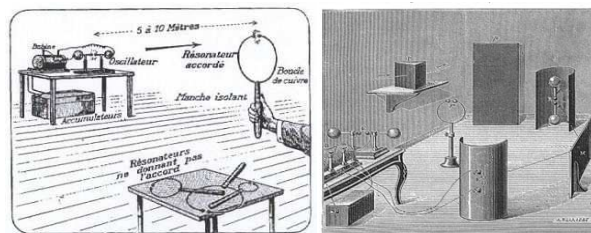


fig 1 : Ustensiles utilisés dans les expériences de Hertz

2.3 De Hertz à Marconi

Guglielmo Marconi naît en 1874 et meurt en 1937. Il s'intéresse aux expériences de Hertz et les améliore considérablement pour réaliser la réception d'ondes électromagnétiques à des distances de plus en plus grandes de leur source. Après la première communication sans fil en langage morse en 1897, il réalise la première liaison radio transmanche en 1899, puis la première liaison transatlantique entre les Cornouailles et Terre-neuve en 1901.

Inventions diverses, créations de sociétés et de compagnies, distinctions, prix, médailles remplissent sa riche existence. Pendant ce temps, les communications par ondes hertziennes prennent leur essor et bouleversent l'ensemble des activités humaines encore jusqu'à aujourd'hui.

On ne mesure pas assez à quel point les expériences de Marconi ont pu être spectaculaires pour l'homme du début du siècle dernier. En effet, la science et la technique rendaient possible la transmission d'informations sur de très grandes distances, sans « fil », et donc sans lien apparent entre la source et le destinataire. De plus, ces communications se faisant à la vitesse de la lumière, elles apparaissaient comme quasi instantanées. Il n'était pas difficile, en tous cas, de les penser comme telles, pour l'homme de la rue ou l'utilisateur de base. Pourtant, le point conceptuel le plus important de la révolution due à Maxwell et Hertz est que les lois sur lesquelles les communications hertziennes reposent – les équations aux dérivées partielles (1) et (2) – sont les premières grandes lois de la physique qui soient *locales*. Elles conduisent à la propagation, à *vitesse finie*, d'une perturbation du champ électromagnétique « de proche en proche ». Le spectateur courant des exploits techniques de Marconi n'a pas dû avoir à l'esprit qu'il y avait bien un « lien » entre émetteur et récepteur en grande conversation sans fil : le milieu – le « vide », l'« éther » – dans lequel la propagation a lieu, insistons sur ce point, à *vitesse finie*.

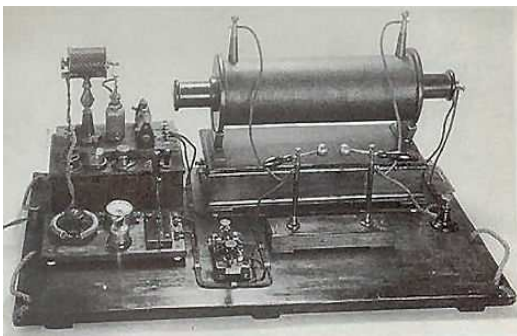


fig 2 : Emetteur de Marconi

3 DES PARTICULES ET DES ONDES

3.1 Louis de Broglie complète le carré

La mécanique quantique est la partie de la physique qui rend compte du comportement des objets aux « petites » échelles. Elle diffère de la physique « classique » (physique newtonienne et relativité(s) comprise(s)) par bien des aspects encore très discutés actuellement, parce que

donnant lieu à des propriétés inédites : parmi elles, un principe de superposition appliqué à tous les objets quantiques et la « dualité onde-corpuscule », auxquels s'ajoutent l'intrication quantique et la non-séparabilité. Suite à l'introduction des « quanta de lumière » par Albert Einstein en 1905, une évidence s'impose à Louis de Broglie qu'il explicite dans sa thèse en 1924 et dans plusieurs notes dès 1923. Si la manifestation des ondes électromagnétiques ne contredit pas l'existence d'une particule de lumière, une onde – en tout cas une oscillation propre – doit « accompagner », dans un sens qui reste à préciser et dont la nature n'est pas de suite spécifiée, toute particule matérielle.

A l'instar de Hamilton au siècle précédent, de Broglie lit simultanément certains grands principes de l'optique et de la mécanique : le principe de Fermat et le principe de Maupertuis. Moyennant l'introduction d'une « action » et des bonnes équations, l'approche héritée de Hamilton et Jacobi établit un parallèle entre mécanique – classique – et optique géométrique. Les surfaces où l'action prend la même valeur sont localement orthogonales aux « trajectoires » de la particule matérielle dans le bon espace – l'« espace de configuration » –, comme les surfaces d'onde le sont aux rayons lumineux dans un milieu hétérogène mais isotrope. Dans l'espace de configuration, la trajectoire de la particule matérielle est alors déterminée comme est déterminé le trajet emprunté par un rayon lumineux dans un milieu isotrope hétérogène.

Dans le cas où les dimensions caractéristiques d'un dispositif optique sont très supérieures à la longueur d'onde de la lumière, son comportement dans le dispositif se laisse décrire par l'optique géométrique. Elle constitue alors une plus ou moins bonne approximation des phénomènes observés. Dans le cas contraire, l'aspect ondulatoire s'impose, en particulier à travers la diffraction qui se manifeste dès lors qu'on examine les choses de suffisamment près. De Broglie complète donc ce schéma optico-mécanique en imaginant les situations physiques où la particule matérielle devra manifester un comportement ondulatoire.

Dans sa réflexion sur les travaux d'Einstein et les conditions de quantification de Bohr-Sommerfeld, de Broglie associe à la particule matérielle une fréquence propre ν . Elle est naturellement reliée à sa masse par l'intermédiaire de son énergie, par $h\nu = \gamma mc^2$, où γ est le facteur relativiste et h la constante de Planck. Il introduit alors la longueur d'onde λ de la particule par l'intermédiaire de la vitesse de phase v_ϕ qu'il relie à la vitesse de groupe v_g par $v_\phi v_g = c^2$. Il obtient finalement

$$\lambda = \frac{v_\phi}{\nu} = \frac{c^2}{v_g \nu} = \frac{h}{\gamma m v_g} = \frac{h}{p}, \quad (3)$$

où la vitesse de groupe v_g est assimilée à la vitesse de la particule et où p est son impulsion relativiste.

En 1927, les expériences de Davisson et Germer apportent, suite à quelques heureux hasards de manipulation, une confirmation expérimentale au possible comportement ondulatoire des électrons. En particulier, ils vérifient que la répartition des impacts des électrons sur une plaque photographique, après avoir « traversé » une

cible de nickel selon un dispositif de type Bragg, suit effectivement une figure de diffraction analogue à celle donnée par la diffraction X par le même cristal dans les mêmes conditions.

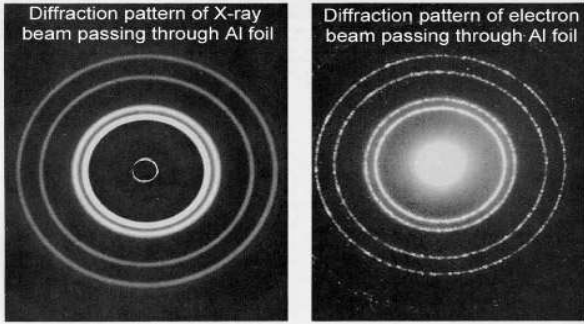


fig 3 : Diffraction de rayons X et diffraction d'électrons

3.2 Microscope de matière

Le principe de base du microscope électronique est simple à comprendre. Pour « éclairer » la matière, on remplace la lumière usuelle, rayon X compris, par un faisceau d'électrons qui se comporteront, dans les conditions requises de leur interaction avec la cible à observer, de façon ondulatoire.

Le pouvoir de résolution d'un microscope dépend de la longueur de la lumière utilisée. La longueur d'onde de de Broglie $\lambda_{dB} = h/p$, pour des électrons suffisamment rapides, peut être nettement plus petite que la longueur d'onde X. Typiquement, pour des électrons soumis à un potentiel d'accélération de 100 kV, $\lambda_{dB} \approx 4.10^{-2} \text{ \AA}$, alors que $\lambda_X \approx 1 \text{ \AA}$ pour des X « mous ». Dans ces conditions, le pouvoir de résolution d'un microscope électronique devra être supérieur à celui du microscope usuel.

Dans la réalisation pratique d'un microscope électronique, il y a plusieurs façons de générer et d'utiliser un faisceau d'électrons. Plusieurs difficultés se présentent, en particulier celles associées à l'établissement d'un faisceau qui soit bien monocinétique et à la qualité des lentilles magnétiques du dispositif.

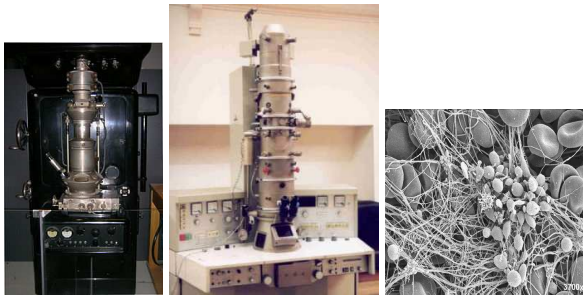


fig 4 : Microscopes électroniques et une image actuelle

La construction du premier microscope électronique, par les ingénieurs Ruska et Knoll, a lieu en 1931 et un brevet est déposé la même année. Louis de Broglie ne participe pas aux démarches de mise en évidence expérimentale de ses concepts, et encore moins à celles conduisant à une mise en forme instrumentale. Décédé en 1987, il consacre sa carrière, après 1924, à réfléchir aux problèmes de fond que pose la mécanique quantique, en particulier à la présence intrinsèque, selon l'interpréta-

tion orthodoxe, du hasard et des probabilités dans la description des objets quantiques. Il développe, en plusieurs temps, sa théorie de l'« onde pilote », une théorie de la « double solution » qui conduit à une masse du photon non nulle, et d'autres réflexions encore. Parmi elles, il envisage la possible description de la dynamique d'une particule en termes de thermodynamique et d'entropie.

4 DU SPIN A L'OBSERVATION INOFFENSIVE

4.1 Une propriété interne de la particule : le spin

Malgré les aspects inédits que présente la physique quantique, les grandeurs physiques usuelles – énergie, impulsion, moment cinétique, fonctions de Lagrange et de Hamilton, etc. – ont leur pendant quantique selon des procédures de « correspondance » qu'on ne peut détailler ici, même si la rigueur de ce dictionnaire se discute lui aussi. Pourtant, d'autres grandeurs – et « nombres » – quantiques ne se déduisent pas d'une quelconque propriété classique. Parmi elles, le spin caractérise n'importe quelle particule, massive ou sans masse. Initialement et parfois associé à la rotation sur son axe d'une particule, le spin correspond à une caractéristique interne de celle-ci, n'impliquant en rien une extension spatiale de la particule comme le ferait la rotation d'un « solide » sur son axe.

Envisagé par Pauli en 1924 comme degré de liberté interne s'ajoutant aux degrés de liberté usuels, le spin, en tant que tel, est introduit par Kronig, Uhlenbeck et Goudsmit en 1925 pour rendre compte de certaines observations que le moment cinétique orbital seul ne peut expliquer. Initialement, l'existence du spin est invoquée pour décrire les interactions des particules chargées avec un champ magnétique, en particulier dans l'expérience de Stern et Gerlach (1922) et dans l'effet Zeeman « anormal ».

Dans l'interaction d'une particule de charge q et de masse m avec un champ magnétique, la grandeur physique importante est son moment magnétique $\vec{\mu}$.

L'interaction avec le champ magnétique \vec{B} se traduit par la présence, dans l'énergie totale, du produit scalaire $-\vec{\mu} \cdot \vec{B}$. Selon qu'il s'agit du moment orbital ou du moment de spin, on a, respectivement

$$\vec{\mu}_L = \frac{q}{2m} \vec{L} \quad \text{et} \quad \vec{\mu}_S = g \frac{q}{2m} \vec{S}. \quad (4)$$

La grandeur sans dimension g est différente selon la particule considérée et différencie les deux moments magnétiques, l'un obtenu à partir du moment cinétique usuel, l'autre à partir du spin. Introduit *ad hoc* par Pauli dans l'hamiltonien de l'équation de Schrödinger pour l'électron non relativiste, le facteur de Landé g apparaît correctement à l'issue de l'approximation non relativiste de l'équation de Dirac (5) (§ 5).

L'introduction du spin va se révéler, le temps passant, plus importante que prévu dans la description du monde quantique. En effet, si le spin est une caractéristique interne des particules, elle va s'avérer être plus fondamentale que leur masse même. D'une part, le spin, selon

qu'il a une valeur entière ou demi-entière, introduit la distinction entre *les deux* types de particules existantes, aux rôles et aux propriétés bien distincts : les bosons et les fermions. D'autre part, selon le modèle standard qui classe les familles des particules et rend compte de leurs interactions – hors gravitation – la masse d'une particule, contrairement à son spin, n'est pas donnée *d'avance*. Elle nécessite un « mécanisme » qui permet à la particule d'« acquérir » une masse, alors qu'elle *a d'emblée* un spin.

4.2 Toupie quantique et imagerie non invasive

L'Imagerie par Résonance Magnétique est une technique « non invasive » utilisant les mécanismes de la Résonance Magnétique Nucléaire. Ce sont dans les années 60 que les principes utilisés dans la RMN sont mis en évidence. Il faut cependant attendre les années 2000 pour que l'utilisation de la RMN permette d'identifier des macromolécules en solution de façon efficace. Le principe de la RMN utilise l'interaction entre le spin total des noyaux de certains éléments et la somme de deux champs magnétiques. Le premier champ est un champ statique, très intense. Autour de la direction de ce champ, les spins des noyaux « tournent » en décrivant en cône : c'est la précession de Larmor. La fréquence de Larmor associée à cette rotation est caractéristique de l'élément. Un second champ magnétique peu intense, alternatif et orthogonal au premier, est appliqué pendant un court instant. Si la fréquence de variation du second champ est suffisamment proche de la fréquence de Larmor – on est alors proche de la « résonance » –, il y a une modification notable de l'orientation du moment magnétique de spin. Après la suppression du second champ, le moment reprend sa position d'équilibre relative au premier champ. Ce retour à l'équilibre génère alors un champ magnétique induit, suivi d'un courant induit dans une bobine, qui est analysé. C'est le signal RMN. L'analyse spectrale de ce signal rend compte de la présence de telle ou telle molécule dans le milieu examiné. Pour localiser les éléments dans l'espace, et en faire une image, le champ magnétique de base est non uniforme de sorte que la fréquence de Larmor dépende de la position du noyau dans l'échantillon analysé. Puisqu'elle repose sur les propriétés mêmes de la matière observée, l'intérêt évident d'une telle technique est bien sûr qu'elle permet l'observation de l'intérieur du corps sans devoir y introduire quoi que ce soit : l'outil du chirurgien ou un quelconque rayonnement plus ou moins destructeur.

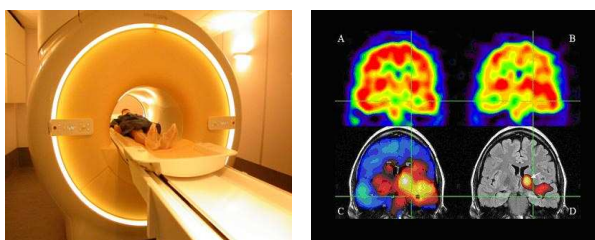


fig 5 : Machine à IRM et ses images

Même s'il a dit « non » à Kronig, Wolfgang Pauli est le physicien associé à la naissance du spin et à son introduction formelle dans les équations. Disparu en 1958, il

aura été l'un des grands théoriciens de la mécanique quantique, écouté par tous et redouté par beaucoup. Auteur du « principe d'exclusion », il aura été relativement éloigné des laboratoires...

5 UTILISER L'ANTIMATIÈRE POUR VOIR

5.1 Les motivations esthétiques de P. A. M. Dirac

Paul Adrien Maurice Dirac est l'un des plus grands créateurs de la physique du 20^{ème} siècle. Totalement inconnu du grand public, il évoque parfois peu de choses chez les physiciens étrangers à la mécanique quantique. Chez les praticiens du traitement du signal, il est l'inventeur d'une « fonction » au comportement exotique.

Suite aux contributions d'Einstein, Bohr, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Pauli et d'autres, il restait à marier les apports de la relativité restreinte et les équations de la physique quantique. En effet, la principale d'entre elles, l'équation de Schrödinger, *n'est pas* invariante sous les transformations de Lorentz-Poincaré (équations (7) § 6).

Dirac ambitionne de célébrer ce mariage en formulant une description relativiste de l'électron. Il pense écrire une équation différentielle *du premier ordre* en temps et en espace, en particulier pour éviter les problèmes que présente la seule « équation d'onde » relativiste alors connue pour une particule matérielle : l'équation de Klein-Gordon. Dirac est alors conduit à construire une équation « mixte » dans sa forme, différentielle *et* matricielle où interviennent, comme par magie, les matrices que Pauli avait introduites en 1927 pour représenter les opérateurs associés au spin de l'électron et formaliser son interaction avec un champ magnétique.

L'équation (5), publiée début 1928, est « simple » dans sa concision et Dirac insistera beaucoup sur le rôle que jouent les motivations esthétiques dans l'élaboration d'une équation traduisant un principe général.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -i\hbar c \vec{\alpha} \cdot \vec{\nabla} \psi + \beta mc^2 \psi \quad (5)$$

Dans le cas d'un électron placé dans un champ magnétique, l'*approximation non relativiste* de l'équation de Dirac conduit à l'*équation de Schrödinger* dont le terme d'interaction spin-champ est correct : le facteur de Landé g , initialement introduit *had hoc* par Pauli, a bien la valeur 2 attendue pour l'électron (relation (4) § 4.1). Sa valeur exacte est cependant légèrement supérieure à 2 et ce sera un grand succès de la théorie quantique des champs que de pouvoir prédire sa valeur avec plus de 11 chiffres significatifs.

5.2 Energies positives et énergies négatives

Une équation renferme toujours plus de choses qu'on ne l'imaginait à sa naissance et donne toujours plus que ce que l'on attendait d'elle. Si on calcule les énergies possibles associées aux fonctions d'onde solutions de (5), on trouve des expressions de la forme

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (6)$$

Associées aux pulsations négatives dans le développe-

ment des solutions de (5), les énergies négatives sont bien valables mathématiquement. Le sont-elles physiquement ? Si oui, comment interpréter le statut des énergies négatives, *non bornées* inférieurement ? Si la réponse à la question est l'existence de ce que l'on nommera l'antimatière, la route vers la réalité de particules symétriques à toutes particules existantes, identiques mais de « charges » opposées, n'a pas été directe. L'hypothèse de l'existence de l'antimatière s'est en effet imposée après quelques discussions entre les grands esprits du moment.

La confirmation observationnelle de l'existence des antiparticules – en tous cas de l'une d'elle – a été produite par Anderson, en 1932, qui détecta dans une chambre à brouillard la trajectoire d'un antiélectron, le positron ou positon, tombé du ciel par l'intermédiaire de radiations cosmiques.

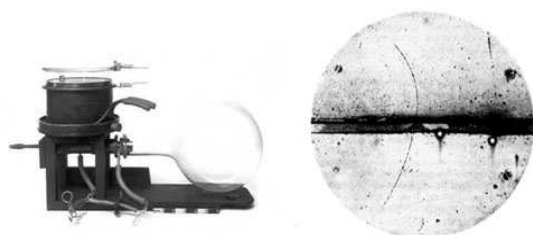


fig 6 : Trajectoires d'un électron et d'un positron dans la chambre à brouillard d'Anderson

5.3 Localiser la matière grâce à l'antimatière

Le principe de la « tomographie par émission de positrons » est basé sur la propriété suivante : si une particule et son antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent et « disparaissent » matériellement pour laisser place à de la lumière sous forme de photons satisfaisant les lois de conservation requises.

Dans le cas présent, on met à profit l'émission d'un positron par désintégration radioactive bêta+ d'un élément instable de période radioactive suffisamment courte, par exemple le Fluor 18. Cet élément, inséré dans une molécule de glucose, fait office de traceur et est injecté par intraveineuse. Il ira se fixer au niveau de tissus consommateurs de sucre, comme par exemple un ensemble de cellules cancéreuses où il se désintégrera. Suite à une désintégration, un électron positif est émis et finira par rencontrer un électron du milieu. On montre que, suite à la collision positron-électron, deux photons sont émis dans deux directions opposées, satisfaisant ainsi la conservation de l'énergie mais aussi celle de la quantité de mouvement. Ils sont alors interceptés dans un détecteur en forme d'anneau qui, par une mesure de coïncidences, indiquera la position de l'émission et par là même la localisation de la tumeur.

La mise au point de l'imagerie utilisant la « tomoscintigraphie par émission de positrons » date des années 50 et l'usage d'une telle technique s'est développé dans les décennies qui ont suivi.



fig 7 : Scanner à positron et images par tomographie

Dirac s'éteint en 1984 et n'a bien sûr joué aucun rôle dans ces entreprises. Il aura été l'un des principaux acteurs qui participent à la deuxième phase de la mécanique quantique : l'introduction des procédures de « seconde quantification » et la naissance de la théorie quantique des champs. L'année 1930 est celle de la parution de *The Principles of Quantum Mechanics* où sont exposés les grands principes de la toute nouvelle mécanique et les « canons » du formalisme pour les exprimer.

6 DE L'ESPACE-TEMPS AU POSITIONNEMENT DANS L'ESPACE ET LE TEMPS

6.1 Un vieux principe : le principe de relativité

Le principe dit *de relativité* date de Galilée. Il stipule que, si R et R' sont deux référentiels inertiels en mouvement – forcément – rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre, les expériences de physique effectuées dans R donneront les *mêmes résultats* que ces mêmes expériences effectuées dans R' . Autrement dit, aucun référentiel inertiel ne peut être distingué, par une quelconque expérience, d'un autre référentiel inertiel. Il n'existe donc pas de référentiel inertiel « absolu » par rapport auquel les autres seraient en mouvement.

Néanmoins, au lendemain des succès de la théorie de Maxwell et des expériences de Hertz, certains pensaient pouvoir utiliser l'électromagnétisme pour *mettre en évidence un milieu privilégié*, l'éther, dans lequel la lumière se propage et *par rapport auquel* tous les corps seraient censés se mouvoir.

Les résultats « négatifs » des expériences de Michelson et Morley traduisent, d'une part, l'impossibilité de cette mise en évidence et, d'autre part, la constance de la vitesse de la lumière mesurée dans n'importe quel référentiel galiléen. Comme chacun sait, Einstein fera disparaître l'éther dans son article de 1905.

En conclusion, le principe de relativité doit inclure l'électromagnétisme dans son énoncé, comme Poincaré l'avait déjà compris et affirmé dans ces mêmes années.

Il est parfaitement possible de déterminer formellement les transformations des coordonnées qui réalisent cette exigence. Ce sont les transformations (7) de Voigt-Lorentz-Poincaré. Elles résolvent par là même les résultats négatifs de l'expérience de Michelson : aucun mouvement de la Terre par rapport à un hypothétique éther n'est décelé. Si R' se meut par rapport à R à la vitesse constante v selon l'axe Ox , on a

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (7)$$

Comme on le constate, les relations (7) spécifient que, si les coordonnées spatiales se transforment quand on passe de R à R' , la *coordonnée temps*, elle aussi, *subit une transformation*, contrairement aux transformations galiléennes à l'œuvre en mécanique et relativité newtonienne.

Ce sont *sous ces transformations*, où le temps subit une modification en fonction de la vitesse relative entre les deux repères ($t' \neq t$), que les équations de Maxwell (1), l'équation de propagation de la lumière (2), l'équation de Dirac (5) et les équations de la nouvelle mécanique sont *invariantes*.

La « théorie de la relativité » porte donc bien mal son nom puisque que les transformations (7) permettent d'étendre l'énoncé introduit par Galilée trois siècles plus tôt et le rendent... plus absolu qu'il ne l'était.

La relativité restreinte, telle que la présentent Poincaré, Einstein et Minkowski, aura introduit de grandes nouveautés conceptuelles, en physique, mais aussi dans notre façon de penser. Beaucoup de concepts réellement neufs auront étonné – et étonnent toujours – par leurs conséquences. La vitesse de la lumière a bien une valeur finie, mais *indépassable* et *mesurée comme constante dans tous les référentiels galiléens*. C'est par son intermédiaire que l'on mesure les intervalles de distance et de temps entre deux « évènements ». On montre alors que la « simultanéité » perd son caractère absolu : deux évènements « vus » (suite à des *mesures* physiques) comme simultanés dans un référentiel, peuvent *ne pas être vus* (aussi après mesure) comme simultanés dans un référentiel en mouvement par rapport au premier.

De façon générale, les durées et les longueurs n'auront pas la même valeur selon qu'elles sont mesurées par un observateur au repos ou en mouvement par rapport à l'horloge et à la « règle » associées à ces mesures.

Mais, en relativité, tout n'est pas relatif. En effet, dans la description des phénomènes spatio-temporels, il existe un *invariant* qui, lui, reste bien *inchangé* :

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2. \quad (8)$$

Qu'il soit *vu* de R ou de R' , on a, suite aux transformations (7), $ds = ds'$, ce qui est parfois présenté comme la base même de la théorie. De plus, on associe à chaque référentiel et à chaque objet un « *temps propre* » qui est le temps mesuré par une *horloge solidaire* du référentiel-objet. De même, la « *longueur propre* » d'une règle est la longueur mesurée par un observateur fixe par rapport à la règle. L'invariant (8) est relié à l'intervalle de temps propre $d\tau$ par $ds^2 = c^2 d\tau^2$ et intervient, dans les équations quadri-vectorielles de la dynamique relativiste, comme intervenait l'élément différentiel dt dans les équations vectorielles newtoniennes.

Si ds est bien *invariant*, comment une « durée » est-elle « perçue » d'un référentiel galiléen R si elle se rapporte à un référentiel galiléen R' , v étant la vitesse relative entre R' et R ? Soit $\Delta t'$ la durée mesurée dans R' , en x' , et Δt la mesure qu'en fait un observateur dans R . On déduit alors de (7) que les deux durées sont reliées par

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t' > \Delta t'. \quad (9)$$

Le facteur γ étant supérieur à 1, la durée $\Delta t'$ associée à

R' semble « dilatée » et l'écoulement du temps ralenti. Pourtant, il n'y a *aucune* « *dilatation* » en tant que telle et cet effet de « perspective spatio-temporelle » est parfaitement *réiproque* : dans la mesure où l'on a affaire à deux référentiels inertiels en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre, *chaque observateur* fera le constat de ce « ralentissement » de l'horloge solidaire du référentiel en mouvement par rapport à lui.

6.2 Une théorie particulière de la gravitation : la relativité « générale »

La relativité générale est une théorie *particulière* de la gravitation dans le sens où elle en propose une description bien spécifique. Elle est différente de celle introduite par Newton où la gravitation est une *force*, *sans être* une *interaction* au sens moderne et *local* du terme.

Dans le cadre de la relativité générale, on appelle « gravitation » les manifestations de la courbure de l'espace-temps. C'est son contenu matériel et énergétique, quelles qu'en soient l'origine et la nature, qui imprime à l'espace-temps sa géométrie.

En absence d'interactions autres, n'importe quel « objet » immergé dans l'espace-temps voit sa cinématique contrainte par sa géométrie, indépendamment de sa masse. Une particule test, massive ou sans masse, évolue alors dans l'espace-temps en suivant ses « géodésiques », comme une particule suivrait un grand cercle sur une sphère ou une droite sur une surface plane. Si la courbure est « faible », la cinématique de la particule est celle déduite de la relation fondamentale de la dynamique où figure un potentiel de gravitation.

La façon dont la matière-énergie modifie la géométrie de l'espace-temps est donnée par les équations de Hilbert-Einstein, où deux tenseurs aux rôles bien particuliers sont simplement proportionnels :

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = k T_{\mu\nu}. \quad (10)$$

Le tenseur d'Einstein $G_{\mu\nu}$ contient toutes les informations sur la nature géométrique de l'espace-temps et le tenseur « énergie-impulsion » $T_{\mu\nu}$ contient les données sur son contenu matériel et énergétique. La constante k est alors déterminée en fonction de la constante de gravitation de sorte que la description newtonienne apparaisse comme cas limite de la relativité générale en champ faible.

Le tenseur d'Einstein et les éléments qu'il contient se déduisent tous du tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ – et de ses dérivées – présent dans le nouvel invariant ou « élément fondamental » :

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (11)$$

L'invariant (11) est celui de la relativité restreinte (8) où le tenseur métrique $\eta_{\mu\nu}$ a été remplacé par le tenseur $g_{\mu\nu}$. En relativité générale usuelle, $g_{\mu\nu}$ contient *toutes les informations* relatives à la *géométrie* de l'espace-temps, décrivant par conséquent les *effets de la gravitation*.

Les conséquences des équations d'Einstein sont gigantesques, qualitativement, par leur nombre, leur portée et beaucoup d'autres aspects qui restent encore à exploiter et à découvrir. Parmi elles, on trouve toutes les « his-

toires » possibles sur l'évolution de notre Univers, d'une pseudo-naissance jusqu'à son éventuelle disparition.

La relativité générale n'est pas née pour résoudre un problème observationnel. Elle s'enracine dans les interrogations sur la nature même du mouvement, et surtout sur un fait remarquable de la gravitation : l'égalité entre la masse dite *pesante* m_p et la masse *inerte* m_i . La « susceptibilité » m_p d'un corps matériel à la force de gravitation égale exactement l'aptitude m_i de ce même corps à s'opposer à tout changement cinématique.

Ceci a pour conséquence que *deux masses différentes* placées dans un champ de gravitation et soumises à cette seule interaction, pour des conditions initiales identiques, sont soumises à la *même cinématique*.

Par exemple, la chute d'une plume ou d'une boule de pétanque, soumises à *la seule gravitation* et lâchées de la même hauteur, arrivent au sol au même instant. Pour un corps immergé dans le champ de pesanteur terrestre, ceci se traduit par l'élimination des deux masses à gauche et à droite de la relation fondamentale de la dynamique :

$$m_i \frac{d\vec{v}}{dt} = m_p \vec{g} \quad \text{et} \quad m_i = m_p \quad \Rightarrow \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} \quad (12)$$

Après quelques expériences de pensée bien menées, nous comprenons que, *localement*, une accélération et les forces d'inertie qui en découlent sont équivalentes à un champ de gravitation. La « gravitation » se ressent donc, du moins *localement*, comme les effets que mesure un observateur dans un référentiel non inertiel.

Insistons sur un des aspects essentiels de la relativité générale. Comme la théorie de Maxwell pour l'électromagnétisme, elle donne une description *locale* de la gravitation. Contrairement à la description newtonienne, les effets de la gravitation se propagent de proche en proche et à vitesse *finie*, celle de la lumière.

6.3 Mesure des durées dans champ de gravitation

La notion de temps propre est bien sûr présente en relativité générale et l'on a toujours, avec (11), $ds^2 = c^2 d\tau^2$. Par contre, d'autres phénomènes s'ajoutent à ceux de la relativité restreinte quant aux mesures de l'écoulement du temps. En particulier, au sein d'un même référentiel, les *durées n'ont plus la même valeur selon les points* où elles sont considérées et dépendent des potentiels de gravitation qui y règnent. Si T_s est la période d'une horloge localisée en un lieu où règne le potentiel φ_s , la durée T_o correspondante observée là où règne le potentiel φ_o dépend de la « différence » entre les potentiels φ_s et φ_o . Dans le cas du simple potentiel de gravitation créé par la Terre, la comparaison entre T_s et T_o dépend donc de la différence d'altitude entre la source s et l'observateur o .

Si l'observateur est placé à une altitude h et la source s est au sol, un calcul indique que la relation entre T_s et T_o est donnée par

$$T_s \approx \left(1 - \frac{GMh}{R^2 c^2}\right) T_o < T_o, \quad (13)$$

où M et R sont la masse et le rayon de la Terre, et G la constante de gravitation. Exprimé en termes de batte-

ments ou de fréquences ν , l'« effet Einstein » est associé à la variation relative :

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\varphi_s - \varphi_o}{c^2}. \quad (14)$$

On obtient un décalage « vers le rouge » si les potentiels de gravitation (négatifs) sont tels que $|\varphi_o| < |\varphi_s|$. Il concerne *tout phénomène périodique* observé d'un lieu où la gravitation est moins intense.

La première mise en évidence expérimentale tangible de ce décalage est réalisée par Pound et Rebka en 1960 ($|\Delta \nu/\nu|$ est ici de l'ordre de 2.10^{-15} ...). Ils utilisent deux échantillons de Fer 57, l'un comme source émettrice, l'autre comme récepteur par absorption de la lumière émise par la source. Placés à la base et au sommet d'une tour d'une vingtaine de mètres où règnent des potentiels de gravitation différents, la source au sol émet, après désexcitation, un rayonnement gamma susceptible d'être absorbé par l'échantillon au sommet. Celui-ci « voit », du fait de l'effet Einstein, la fréquence des gammas émis, légèrement inférieure – « décalée vers le rouge » – et ne peut donc les absorber. On mesure ce décalage en le compensant par effet Doppler en faisant se mouvoir l'échantillon récepteur vers l'émetteur.

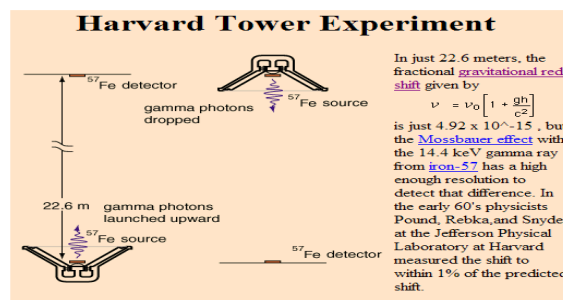


fig 8 : Schéma de l'expérience de Pound et Rebka

6.4 Connaître sa position

Parmi les instruments à la mode et d'usage courant, le GPS figure en bonne place. Comme chacun sait, il permet de se localiser à la surface du globe avec une bonne précision si on s'en donne les moyens. Son fonctionnement repose sur des mesures de distances et de décalages temporels entre différents points dans l'espace. Les acteurs de ces mesures sont des satellites en nombre suffisant et positionnés correctement au dessus de nos têtes, et la personne qui exige de savoir où elle se trouve à tout instant. Celle-ci fait office de récepteur dont l'instrument calcule sa position à partir de signaux émis par les satellites. Ces signaux ont, dans leur parcours depuis l'émetteur jusqu'au récepteur, une histoire à la physique parfois compliquée qui doit prendre en compte plusieurs phénomènes qui imposent un certain nombre de corrections. Parmi les données dont on doit tenir compte de façon évidente, figurent les configurations astronomiques aux moments des émissions et réceptions, les difficultés propres au traitement du signal, la différence de qualité entre les horloges des satellites et du récepteur et les propriétés des différentes couches atmosphériques traversées (pression, température, etc.). Dans la mesure où ces problèmes seraient contournés

correctement par un jeu de compensations efficaces, on devra aussi tenir compte des décalages entre les battements des horloges des satellites et du récepteur imposés par les deux volets de la relativité. En effet, un satellite peut se mouvoir, par rapport à la surface de la Terre, à une vitesse suffisante pour que la correction donnée par la relation (9) doive être prise en compte. L'horloge du satellite en mouvement sera vue comme battant plus lentement par l'observateur au sol que sa propre horloge. De plus, la position même des satellites les place à des hauteurs où le champ gravitationnel est moindre qu'à la surface de la Terre. C'est alors la relation (13) qui rentre en jeu. Ces deux corrections visent à réaliser la bonne comparaison entre les battements des horloges des satellites et du récepteur au sol, sans laquelle une mesure de différence de temps pourra ne pas avoir la précision demandée.

Les équations (10) de Hilbert-Einstein datent de 1915. Il se sera donc écoulé presque un siècle entre leur écriture et un calcul associé à une utilisation « courante ». Très longtemps, la relativité générale a été considérée par certains comme une théorie presque trop spéculative. Associée à des effets extrêmement fins, elle sera restée bien éloignée des choses du quotidien et encore plus des objets qui le composent. La prise en compte du « ralentissement » des horloges donné par (9) et de l'effet Einstein dans le fonctionnement du GPS est souvent mise en avant. Mais ce serait méconnaître et dénaturer ce que nous offre réellement la relativité, restreinte et générale, quant à l'étendue de ses conséquences et son impact sur la physique, que de considérer cette utilisation comme un quelconque aboutissement de la théorie.

7 CONCLUSION

Les quelques scénarios décrits dans cet article sont trop peu nombreux pour prétendre établir une loi générale sur la destinée d'un concept scientifique. D'autant que nous avons omis les exemples des mathématiques et de la biologie. Nous aurions aussi pu rendre hommage aux grands penseurs des « machines » et des instruments : Carnot, Turing ou même Shannon. Néanmoins, nos choix nous semblent suffisamment représentatifs des nombreux cas dont on n'a pas parlé pour énoncer un certain nombre d'évidences.

i. La première d'entre elles concerne ce que l'on peut savoir des motivations qui animent les auteurs des « grands concepts ». Dans chacun de nos exemples, elles se rapportent exclusivement au désir de découvrir si les phénomènes naturels sont assujettis à des lois et, si oui, de retranscrire ces lois. Elles ne concernent pas la moindre « application » ou concrétisation des lois qu'ils découvrent et formalisent. Les biographies et les nombreux échanges dont on dispose traduisent clairement l'absence totale de motivations utilitaristes. Les préoccupations et activités intellectuelles des « pères fondateurs » ne s'inscrivent pas non plus dans un quelconque projet philanthropique qui rendrait la collectivité plus heureuse. On est donc bien aux antipodes de la course à l'application obligatoire, fût-elle généreuse. Bien loin, aussi, du culte dont fait l'objet la technologie de masse actuelle.

On comprend donc aisément que, du concept à l'instrument, les acteurs qui interviennent opèrent sur des terrains extrêmement différents : des « penseurs » de la physique à l'« artisan-fabriqueur » de prototypes, en passant par l'expérimentateur, chacun évolue dans des sphères propres, parfois antagonistes et qu'il serait bien artificiel de vouloir fusionner.

On a mentionné, dans le cas de Dirac, que le sentiment esthétique était loin d'être absent et d'être accessoire (« *I found it beautiful.* », se serait dit Dirac pour s'assurer *a priori* de la légitimité de son équation). S'il constitue un moteur pour énoncer de grands principes et construire des équations « forcément simples », il est aussi un guide permettant, dans une phase présélective, d'écarter les options supposées mauvaises... parfois à tort. Comme chez Dirac où il a joué un rôle important, il est évident qu'un même souci esthétique, conduisant aux bons concepts et aux bonnes équations, même par des voies finalement abandonnées, est aussi présent dans les démarches de de Broglie et d'Einstein, l'un réfléchissant au parallèle entre le principe de Fermat et le principe de Maupertuis, l'autre s'appuyant sur le principe d'équivalence pour aller vers la relativité générale. N'importe qui, en tous cas, peut être saisi par ce même sentiment à la simple lecture du tableau périodique des éléments de Mendeleïev, ou en considérant l'ordre qu'introduisent, dans la classification des particules, le choix du bon groupe de transformation et l'hypothèse de l'existence des quarks.

Le présupposé esthétique est donc certainement moins vague qu'il n'y paraît : il conduit à faire des choix guidés par un « principe d'économie » appliqué à la formulation d'une hypothèse, d'un scénario et à la forme d'une équation. Les doutes exprimés sur *les* théories des cordes reflètent certainement le contraste entre l'importance affichée de certains résultats et l'apparition d'« effets secondaires » qui alourdissent l'édifice total. La quête de la permanence et du sens est aussi très présente. Quelle soit déclarée, silencieuse ou dissimulée. Les phénomènes naturels sont *a priori* bien difficiles à cerner mais les quelques éléments de régularité qu'ils présentent doivent conduire aux lois qui traduisent de la permanence et du sens. Permanence et sens qui se manifestent dans les grands principes ou « super lois » de la physique : lois de conservation et symétries, principe(s) de relativité, principes thermodynamiques, respect de la causalité, etc. Même si l'on doit renoncer à de vieilles croyances (caractère absolu de la simultanéité, localité obligée des lois de la physique, etc.) ou à des croyances mal formulées (principe de relativité appliqué à *la seule* mécanique), il est crucial que ces grands principes soient sans cesse testés, reformulés correctement si nécessaire, pour être sûr de ce qui doit rester.

ii. La seconde évidence qu'imposent les exemples passés en revue concerne les équations. Associées à un principe général, elles contiennent toujours bien plus qu'on ne pouvait l'imaginer au départ.

Comme nous l'avons vu avec la valeur du facteur de Landé pour l'électron et la découverte des antiparticules, ceci est vrai pour l'équation de Dirac (5). L'évocation des « théories de jauge » – associées à la physique des particules et à leurs interactions – et de la

cosmologie – la science de l’histoire de l’Univers – nous rappellent que les équations de Maxwell (1) et les équations d’Einstein (10) conduisent, elles aussi, à des concepts théoriques et à des objets physiques totalement insoupçonnés initialement. Il est par conséquent impossible de prédire d’emblée tout ce qu’un ensemble de relations, si elles sont profondes, offrira et permettra d’élaborer, *a fortiori* s’il s’agit d’instruments.

iii. La dernière évidence qui s’impose est double. D’une part, il est impossible de prévoir, au moment de leur naissance, sous quelle forme un grand concept ou une grande loi se matérialisera, même si, tôt ou tard, n’importe quel concept finit par s’incarner dans le fonctionnement d’un instrument, voire d’un objet quotidien. D’autre part, il est bien sûr impossible de prédire le temps qui va séparer la naissance d’un concept de sa réalisation « pratique » : cinq ans, deux décennies ou plusieurs siècles, tous les délais sont possibles et observés. L’essentiel de l’arithmétique de la cryptographie RSA en est un bon exemple.

A *contrario*, on peut conjecturer que la possibilité d’une quelconque planification concernant la mise en œuvre d’un principe, implique... que le principe en question n’est pas de première importance.

Quant au cadre et au contexte desquels émergera le prochain bouleversement conceptuel, il semble bien difficile, voire impossible, d’en dire quoi que ce soit. Encore moins de créer ce contexte de toutes pièces et de décrire les objets et les instruments qui en sortiront.

Pour conclure, indiquons les quelques thèmes qui peuvent s’insérer dans un projet tuteuré donné à des étudiants de premier cycle scientifique et technologique, en particulier en DUT R&T.

Le premier d’entre eux concerne bien sûr les communications hertziennes évoquées § 2. Des cours sont explicitement dispensés sur les bases de l’électromagnétisme et la propagation de la lumière. De plus, un module sur les fonctions de plusieurs variables (dérivées partielles, équations aux dérivées partielles, intégrales multiples, etc.) est proposé. Un travail approfondi sur les différents aspects traités § 2 peut donc être effectué avec profit.

Les cours d’informatique, en particulier sur la problématique du stockage de l’information et des données, permettent d’introduire des éléments de « spintronique » et des recherches sur le spin abordé § 4.

Des projets sont aussi proposés sur le fonctionnement du GPS. L’étudiant doit alors considérer les différentes corrections à apporter aux calculs d’intervalles de temps. Par conséquent, les aspects abordés § 6 sur la mesure du temps, telle que la décrit la relativité, peuvent être introduits, au moins être évoqués.

Dans tous les cas, il est possible que des calculs soient à la portée des étudiants tout en ayant une signification physique profonde que nous pouvons alors introduire et commenter. C’est par exemple le cas de l’invariance de l’équation d’onde (2) et de l’« élément fondamental » (8) sous les transformations de Lorentz-Poincaré (7).

De même, les matrices de Pauli peuvent faire l’objet de calculs matriciels très simples vérifiant leurs propriétés, directement associées au spin de l’électron.

Des calculs d’ordres de grandeur peuvent aussi être effectués concernant divers points : la longueur d’onde de de Broglie (3) de certaines particules à comparer aux longueurs d’onde électromagnétiques ainsi que les corrections relativistes associées aux formules (9), (13) et (14).

Enfin, des situations cinématiques simples peuvent donner lieu à quelques réflexions sur le principe d’équivalence, si important en relativité générale.

Insistons sur le fait qu’il est profitable qu’un étudiant puisse, occasionnellement, ouvrir son esprit à des aspects des sciences excédant son cursus, quitte à pénétrer des territoires jugés difficiles et au dessus du niveau requis. L’entreprise en est stimulante, pour l’étudiant comme pour son tuteur, forçant l’un comme l’autre à sortir de sa routine.

Remerciements – L’auteur remercie Thérèse Leblois et Fabrice Sthal pour leur accueil à Besançon lors du Cetsis 2014 et pour la présentation associée à cet article.

Bibliographie

Les ouvrages de grande qualité qui suivent se rapportent, partiellement ou dans leur totalité, aux thèmes traités dans cet article : électromagnétisme et optique [1-3], mécanique quantique [4-9] et relativité [10-12]. Les quelques sites Web [13-16] indiqués renferment les images insérées dans cette présentation. On trouvera des éléments biographiques très intéressants dans [17-20].

- [1] André Chappert, « Histoire de l’optique ondulatoire. De Fresnel à Maxwell », *Editions Belin*, 2007.
- [2] Marcello Alonzo et Edward J. Finn, « Physique Générale. Tome 2 : Champs et Ondes », *InterÉditions*, 1986.
- [3] Frank S. Crawford Jr. « Cours de Physique de Berkeley. Volume 3 : Ondes », *Librairie Armand Colin*, 1972.
- [4] José Leite Lopes et Bruno Escoubès, « Sources et évolution de la physique quantique. Textes fondateurs », *Masson*, 1995.
- [5] Erwin Schrödinger, « Mémoires sur la mécanique ondulatoire », *Editions Jacques Gabay*, 1933-1988.
- [6] Léon Brillouin, « Les tenseurs en mécanique et en élasticité », *Editions Jacques Gabay*, 1938-1987.
- [7] Albert Messiah, « Mécanique quantique, Tomes 1 et 2 », *Nouvelle Édition Dunod*, 1995.
- [8] Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu et Franck Lalöe, « Mécanique quantique, Tomes I et II », *Hermann*, 1992.
- [9] E. Chpolski, « Physique atomique, Tomes 1 et 2 », *Editions Mir*, 1977.
- [10] Lev Landau et Evgueni Lifchitz, « Théorie des champs », *Editions Mir*, 1989.
- [11] Philippe Tourrenc, « Relativité et gravitation », *Armand Colin*, 1992.
- [12] Charles Kittel, Walter D. Knight et Malvin A. Ruderman « Cours de Physique de Berkeley. Volume 1 : Mécanique », *Librairie Armand Colin*, 1972.
- [13] <http://visite.artetmetiers.free.fr>
- [14] http://uel.unisciel.fr/chimie/strucmic/strucmic_ch01/co/apprendre_ch1_25.html
- [15] <http://www.futurasciences.com/magazines/matiere/infos/dossier/s/d/physique-physique-saga-particules-596/page/2/>
- [16] http://astro.physics.uiowa.edu/~rlm/mathcad/addendum_10_gravitational_redshift_and_time_dilation.htm
- [17] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-bio.html
- [18] http://www.academie-sciences.fr/activite/archive/dossiers/Broglie/Broglie_publi.htm
- [19] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1933/dirac-bio.html
- [20] <http://www.youtube.com/watch?v=YfYon2WdR40>