La radio, mère de la théorie de la relativité,

par Jean-Pierre Bourdier **F6FQX**.

Les grandes découvertes sont souvent des œuvres collectives, émergeant peu à peu d'un contexte qui s'y prête, et parce que les théories préexistantes n'expliquent plus des expériences récentes. Un cas d'école est celui de la théorie de la relativité, « cristallisation de la théorie électromagnétique » selon les propres mots d'Einstein. Elle a bouleversé plus de 2000 ans de géométrie, remis en cause des certitudes ô combien respectables puisque consacrées par Galilée et Newton. Mais se souvient-on que ce sont la radio et les ondes électromagnétiques qui sont à l'origine de la relativité ?

Cet article retrace la genèse de la théorie de la relativité, pièce en 4 actes :

- acte I : au XVIIIème siècle, un univers stable, aux ordres d'Euclide, Galilée, Newton ;
- acte II : au XIXème siècle, l'irruption de trouble-fête, l'électromagnétisme, les ondes radio ;
- acte III : au début du XXème siècle, la révolution scientifique met à bas l'absolutisme du temps ;
- acte IV : tout au long du XXème siècle, l'ordre nouveau triomphe, aucune expérience ne l'infirme.

Acte I :

Au XVIIIème siècle, un univers stable, aux ordres d'Euclide, Galilée, Newton.

La physique est alors surtout la mécanique des corps solides, elle-même fille de la géométrie grecque de l'Antiquité, et en particulier d'Euclide qui a si bien défini les concepts et les postulats décrivant le monde (géo :la Terre ; métrie : la mesure). On sait par exemple que par un point passe une seule parallèle à une droite, et nul n'en doute (pas encore…).

Galilée, seize siècles plus tard, apparaît à juste titre comme le père fondateur de la physique moderne, en particulier en ce qui concerne la cinématique (la science du mouvement). Il explique comment on se repère dans l'espace à trois dimensions (latitude, longitude, altitude par exemple), découvre une mesure fidèle du temps : la loi d'oscillation du pendule (en observant le mouvement des lustres au plafond de la cathédrale de Pise, et en les corrélant avec les battements de son cœur…), énonce une loi fondamentale : dans un référentiel donné, un corps soumis à aucune force se déplace en ligne droite à vitesse constante (on parle de référentiel galiléen).

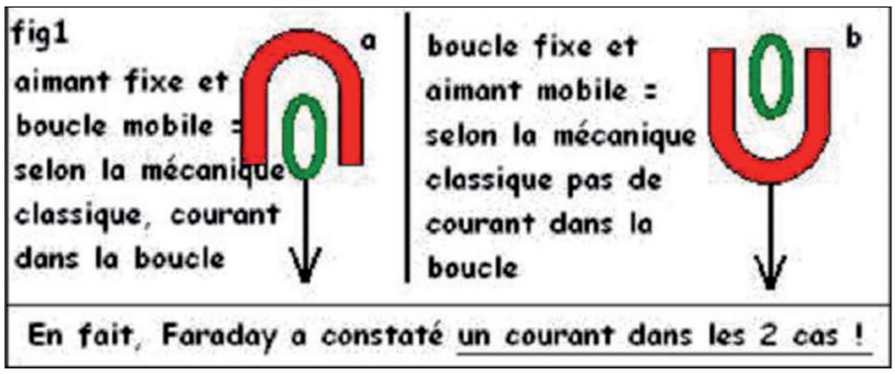
Newton, un siècle plus tard, énonce la loi de gravitation universelle : l'univers est fait d'étoiles fixes, l'une d'elle (le Soleil) a un cortège de planètes tournant autour de lui sur des orbites elliptiques ; ce mouvement est parfaitement défini par la gravitation (attraction de chaque planète par le Soleil, proportionnellement à sa masse et à l'inverse du carré de la distance). La Terre, à son tour, fait tomber la pomme de l'arbre par le même mécanisme.

Tout cela se passe en fonction d'une variable non spatiale, le temps, dont on ne sait pas bien ce que c'est, mais qu'on suppose absolu (c'est-à-dire unique et s'imposant partout dans l'univers).

Acte II :

Au XIXème siècle, l'irruption de trouble-fête, l'électromagnétisme, les ondes radio.

Le XIXème siècle est celui de la révolution industrielle, possible grâce à de nouvelles sources d'énergie capables de remplacer le travail musculaire humain et animal. Thermodynamique (à l'origine des moteurs à vapeur) et électromagnétisme (à l'origine des moteurs électriques) y pourvoiront, mais le second a un défaut : il enfreint les lois de la mécanique classique. Un exemple célèbre de cette « désobéissance » est dû à Faraday, à qui l'on doit le puissant concept de champ vectoriel (cf. figure 1).



Un peu plus tard, vers 1840, Fizeau qui, lui, travaille sur la lumière (sans savoir encore que c'est une onde de nature électromagnétique), fait la première mesure de sa vitesse à 5 % près (il trouve 315 Mm/s) et découvre que, dans de l'eau circulante, elle se déplace à une vitesse qui ne respecte pas les loi d'addition des vitesses de Galilée-Newton.

Enfin, le « summum de la rébellion » a lieu quand Maxwell en 1873 et Hertz en 1888, découvrent les ondes électromagnétiques, le premier mathématiquement par ses fameuses équations, le second expérimentalement (lors de la présentation qu'il en fit à l'université de Karlsruhe, l'un de ses étudiants lui demanda s'il pensait que ses ondes auraient un jour des applications pratiques ; réponse du professeur Hertz « aucune ! »…).

Ces ondes se propagent à la vitesse de la lumière et sans référence à aucun référentiel, ce qui est contraire à la mécanique de Galilée-Newton. C'est troublant, mais conforme à ce que Morley et Michelson, dans une série d'expériences célèbres de 1881 à 1887, mettent en évidence en recherchant un référentiel invisible, qu'on appelle alors éther, et dont ils découvrent en fait qu'il n'existe pas !

Les ondes électromagnétiques, dont la lumière fait partie, se déplacent à la même vitesse quel que soit le référentiel qu'on prenne ; au regard des lois de la mécanique classique, c'est un peu comme si le javelot d'un lanceur (cf. figure 2) volait à la même vitesse, que le lanceur prenne de l'élan ou qu'il n'en prenne pas : impensable !

Un véritable dilemme se pose alors aux savants à la charnière du XIXème au XXème siècle : d'une part les lois d'Euclide-Galilée-Newton ayant prouvé leur immense efficacité, donc leur vérité, on ne peut imaginer de les condamner : d'autre part les lois de l'électromagnétisme étant d'ores et déjà d'une large application, il n'est pas imaginable de les rejeter non plus.

Comment s'en sortir ?

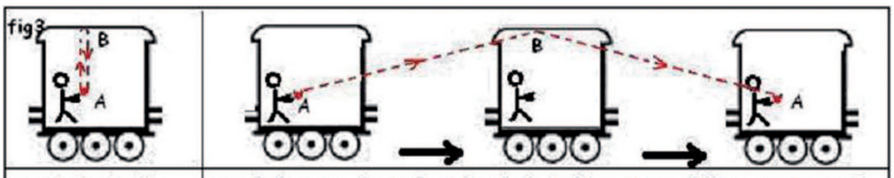
Figure 2

Lumière et ondes radio se déplacent à la même vitesse quel que soit le référentiel : c'est comme si le lancelot volait à la même vitesse, que la lanceuse prenne son élan ou reste immobile. Pas étonnant que la relativité ait été très contestée...

Acte III :

Au début du XX ème siècle, la révolution scientifique met à bas l'absolutisme du temps.

En science, une invention est rarement le fait d'une personne isolée, même si la postérité, ingrate, ne retient souvent qu'un seul nom. Ainsi, la théorie de la relativité est de nos jours généralement attribuée au seul Einstein, alors que des savants comme Poincaré et Lorentz en ont énoncé avant lui les formules de base (au moins en ce qui concerne la relativité restreinte, car la relativité générale est réellement la création d'Einstein, avec l'appui mathématique de son ami Grossmann et de Hilbert). Néanmoins, Einstein a su, mieux que quiconque, faire de la relativité restreinte une synthèse magistrale et claire à comprendre dès sa première publication en 1905.
Evoquons d'abord la relativité restreinte, qui ne concerne que les référentiels galiléens, c'est-à-dire en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres, et essayons de le faire sans maths, en imaginant un enfant immobile dans un train qui roule à vitesse constante et traverse une gare (cf. figure 3).



vue du train, la trajectoire de la balle lancée par l'enfant est verticale de A à B puis retour à A

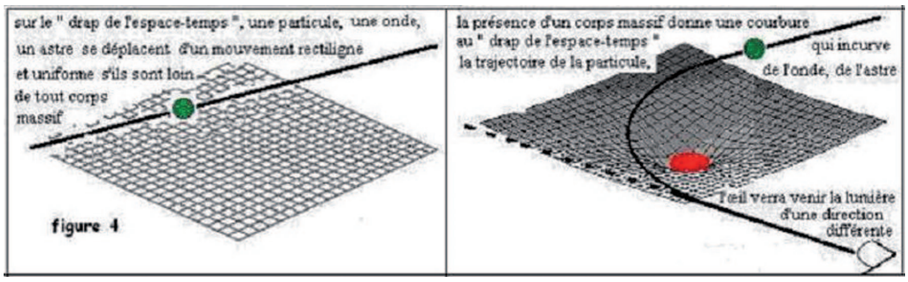
vue de la gare, la trajectoire de la balle est une oblique montante de A vers B, puis une oblique descendante de B retour vers A ; son parcours est donc plus long que tel que vu par l'enfant ; si la balle est "lumière", sa vitesse étant la même dans les 2 cas, le temps se sera écoulé moins vite pour l'enfant que pour le chef de gare

Le chef de gare observe l'enfant et voit tous ses gestes (supposons la cloison du train transparente). L'enfant joue à la balle : il l'envoie sa balle à la verticale, la fait rebondir sur le plafond du wagon et la rattrape. On néglige la pesanteur. Quelle est la trajectoire de la balle :
• vue par l'enfant, elle est verticale, composée de deux segments de droite, aller et retour ;
• vue par le chef de gare, elle est composée de deux segments obliques, l'un montant, l'autre descendant : on voit que la balle parcourt un chemin plus long quand c'est le chef de gare qui l'observe que quand c'est l'enfant ;
• si la balle est « de la lumière » (un photon au lieu d'un ballon…), elle va donc à la même vitesse dans les deux cas, ce qui a pour conséquence que son aller-retour de l'enfant à l'enfant prendra plus de temps vu par le chef de gare que par l'enfant ; autrement dit, le temps n'est pas le même pour l'enfant et pour le chef de gare (les amateurs de Pythagore trouveront facilement sur cet exemple la formule reliant les deux temps ; pour une démonstration simple des formules générales, cf. sur mon site, bibliographie 3-a).

De ces simples formules, Poincaré, Lorentz, puis Einstein ont déduit les conséquences suivantes :
• le temps n'est pas absolu (il s'écoule plus vite pour le chef de gare que pour l'enfant) ;
• les longueurs non plus (le wagon est plus court vu par l'enfant que par le chef de gare) ;
• énergie et masse sont de même essence, deux aspects d'une « même chose » (c'est la célèbre formule e = mc2) ;
-• la vitesse des ondes dans le vide est un maximum qu'aucun corps doué de masse ne peut atteindre ; si la vitesse d'un corps approche la vitesse de la lumière, son énergie tend vers l'infini, son épaisseur tend vers zéro, son temps tend « à ne plus s'écouler » (soyons donc circonspects quand des médias annoncent qu'on a observé des neutrinos plus rapides que la lumière… avant de découvrir des erreurs de mesure : GPS défectueux, fibres optiques mal connectées !) ;
- aux vitesses petites au regard de celles de la lumière, donc à toutes les « vitesses de la vie courante », les effets précités deviennent négligeables, et les lois de la mécanique d'Euclide-Galilée-Newton sont suffisantes (la mécanique classique est donc un cas particulier de la mécanique relativiste).

Evoquons maintenant la relativité générale, qui fit l'objet d'une première publication d'Einstein en 1915. Ce dernier expliqua plus tard qu'en rester à des référentiels se mouvant de façon rectiligne uniforme, donc sans subir d'accélération, était frustrant pour lui, car l'univers est surtout fait de forces, à commencer par la gravitation. Il a donc repris les mêmes prémisses : un phénomène physique doit pouvoir s'exprimer de façon comparable d'un référentiel à un autre, quel que soit ce référentiel (on parle alors de « covariance des lois physiques » avec lesdits référentiels).
Mais, dès qu'il est question d'accélération ou de force, la problématique est autrement plus compliquée, car les outils mathématiques à mettre en œuvre ne se limitent plus à des équations du 1er degré (il aura fallu au savant dix ans de travail ardu, avec l'aide des plus grands mathématiciens, pour arriver à formuler les lois de la relativité générale). En particulier, le calcul vectoriel doit s'effacer devant le calcul tensoriel (bien connu en matière de sciences du génie civil : mécanique des sols, poutres, structures déformables, etc.), la géométrie d'Euclide doit céder la place à celle de Riemann, etc. Pour des précisions sur les 'aspects maths' de la relativité générale, cf. mon site, bibliographie 3-a).

Donnons simplement les conséquences principales des formules de la relativité générale :
• le temps non seulement n'est pas absolu, mais il est totalement imbriqué avec l'espace, à tel point que, selon Einstein, on ne peut plus parler en termes de « temps et d'espace », même liés comme on le faisait encore en relativité restreinte, mais on doit le faire en termes de « continuum spatio-temporel » ; à noter que ce dernier terme à été tellement galvaudé par la science-fiction qu'il a peu à peu perdu le sens très précis que lui donnait Einstein, et qu'on préfère généralement aujourd'hui parler d'espace-temps (ou d'univers, mais sans oublier que cela comprend le temps et l'espace)..
• l'espace-temps est « peuplé » de rayonnements sans masse (lumière, ondes électromagnétiques, etc.) et de corps doués de masse (astres, fermions, etc.) qui sont autant de formes d'énergie puisque « masse = énergie » ;
• rayonnements et masses déforment l'espace-temps (à l'image, simpliste mais éloquente, d'une masse posée sur une toile tendue (cf. figure 4). En particulier, le temps s'écoule plus lentement près d'une étoile massive, et l'univers que nous observons n'a pas le même âge partout (beau sujet de méditation, n'est-ce pas…) ;
• la gravitation n'est pas une force à distance (théorie de Newton), mais une déformation de l'espace-temps qui courbe les trajectoires des corps doués de masse et des rayonnements (ils suivent ses géodésiques, à l'image de l'eau qui suit la ligne de plus grande pente de la vallée) ; là encore, ne pas oublier



que la courbure concerne l'espace et le temps…

• cette déformation de l'espace-temps par les objets qui s'y trouvent a pour effet une sorte de « plasticité généralisée des référentiels » qu'Einstein décrit en disant qu'il ne faut plus penser en termes de repères rigides (axes des abscisses, des ordonnées, etc.), mais en termes de « mollusque de référence ». Et il reparlera de son mollusque à de multiples occasions dans ses écrits et ses conférences : le génie d'Einstein, c'est aussi sa capacité à parler simplement de choses complexes… Cela lui sera reproché par des confrères (hélas, rien n'a changé depuis le Malade Imaginaire de Molière) ;

• si des astres courbent d'autant plus les trajectoires spatio-temporelles des rayons lumineux qu'ils sont massifs, alors on peut imaginer que des astres soient si lourds que rien ne peut en échapper, même pas la lumière qui « tombe dedans et ne peut en ressortir » : de véritables gouffres cosmiques invisibles ou « trous noirs » ?

• la relativité générale se ramène à la relativité restreinte, voire à la mécanique de Newton dans les endroits les moins courbés de l'espace-temps (on retrouve le même emboîtement qu'entre relativité restreinte et mécanique classique) ;

• l'univers étant courbé, se pose alors un problème cosmologique inattendu : l'univers est-t-il fini ou infini (dans l'espace comme dans le temps), et « se dilate-t-il, se contracte-t-il ou est-il stable » ?

Acte IV :

Tout au long du XX ème siècle, l'ordre nouveau triomphe : aucune expérience n'infirme la théorie de la relativité.

La relativité suscita incompréhensions et ricanements jusque vers 1960 pour plusieurs raisons : la relativité restreinte à cause de ce temps non absolu : si le chef de gare avait son jumeau dans le train, les deux jumeaux ne vieilliraient pas à la même vitesse (paradoxe devenu célèbre sous le nom de paradoxe des jumeaux de Langevin, et vulgarisé par le film « la planète des singes »)…, la relativité générale à cause du niveau mathématique très abstrait et très élevé qu'elle requiert (n'oublions pas qu'Einstein lui-même a dû se faire aider) et de cette bizarrerie de « continuum spatio-temporel ressemblant à un mollusque dans lequel la lumière s'enroule autour des astres »… A noter que la théorie de la relativité, bien que révolutionnaire, ne donna lieu à aucun Nobel (obtenu par Einstein en 1921, mais pour l'effet photoélectrique).

Einstein avait conscience du caractère très abstrait de sa théorie, puisqu'il écrivit lui-même qu'il suffirait d'une seule petite expérience la démentant pour qu'elle s'écroule toute entière… Or, toutes les expériences accumulées jusque dans la seconde moitié du XXème siècle ne firent au contraire que la confirmer. Nous n'en citerons que quelques-unes :

• le temps non absolu est devenu une expérience quotidienne depuis qu'on sait observer, dans le rayonnement cosmique ou dans les accélérateurs, des particules « volant presqu'à la vitesse de la lumière » ; c'est d'ailleurs parce qu'elles vivent beaucoup plus longtemps en vol qu'au repos qu'on « a le temps » de les voir ou qu'elles viennent jusqu'à nous ;

• les équations de Maxwell, la loi d'induction de Faraday, exprimées en termes relativistes, deviennent covariantes, et expriment clairement que champ magnétique et champ électrique ne sont qu'une « même chose » (cf. bibliographie, 3d) ;

• l'équivalence masse-énergie fut prouvée « militairement » en 1945 à Hiroshima et Nagasaki, et l'est tous les jours « civilement » au sein des 440 réacteurs nucléaires mondiaux (dont 10% sont en France) ;

• la courbure de rayons lumineux par gravitation autour du soleil a été observée pour la première fois lors de l'éclipse du 29 mai 1919, qui consacra la théorie de la relativité. Elle le fut plusieurs fois ensuite ;

• la trajectoire exacte de Mercure que la loi de Newton ne parvenait pas à expliquer complètement le fut grâce aux équations de la relativité générale ;

• les raies lumineuses du spectre des étoiles sont d'autant plus décalées vers le rouge que ces astres sont massifs : ces raies étant en fait le battement des horloges que sont les atomes, cela signifie que le temps propre de ces atomes est ralenti par la masse des étoiles ;

• les premiers trous noirs furent observés dans les années 1960, et on estime aujourd'hui à 100 millions le nombre d'entre eux au sein de notre seule galaxie ;

• le GPS, outil banal dans nos voitures, et l'APRS cher à tout OM moderne, n'existent que parce que les trajectoires

des satellites sont calculées d'après les équations de la relativité générale, les lois de Galilée-Newton étant dans ce cas insuffisantes (cf. figure 5) ;

• la cosmologie, enfin, a fait depuis 1915 des pas de géant, inconcevables sans la relativité générale : galaxies et amas de galaxies, big-bang, expansion de l'univers, quasars, pulsars, étoiles à neutrons, etc. en sont des « retombées de premier choix ».

Einstein a écrit « la relativité est la cristallisation de la théorie électromagnétique ». La filiation entre l'onde radio et la relativité est donc sans ambigüité. D'ailleurs, on peut remarquer que, bien que toutes deux soient déjà vieilles de cent ans, elles ne sont hélas ni l'une ni l'autre enseignées, même dans leurs principes, au niveau du secondaire. On pourrait aussi dire la même chose d'autres disciplines modernes, comme l'épidémiologie ou la génétique industrielle. Au fond, cette ignorance collective face à des savoirs scientifiques récents n'expliquerait-elle pas le peu de considération que nos sociétés développées ont pour la recherche scientifique ? N'expliquerait-elle pas aussi certaines peurs irrationnelles d'une partie du public vis-à-vis de choses qu'il ne comprend pas, et qui conditionnent pourtant son quotidien : les ondes, les technologies nucléaires (on dit IRM et non plus RMN, par crainte que le N -pour nucléaire- effraie les patients), le génie génétique, etc. ?

Bibliographie :
1 - Des écrits d'Albert Einstein lui-même :
1a - un texte fondamental « die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie" (1916).
1b - un texte plus facile « la théorie de la relativité restreinte et générale », chez Dunod (1999).
1c – « quatre conférences sur la théorie de la relativité » (éditions Jacques Gabay).
1d - un livre lumineux « Einstein et la relativité générale, les chemins de l'espace-temps » de Jean Eisenstaedt, CNRS 2002.
2 - Sur le thème de l'apport d'Henri Poincaré, un article de Christian Marchal, professeur de mécanique céleste à l'observatoire de Paris « Henri Poincaré : une contribution décisive à la relativité » http://annales.org/archives/x/poincare7.html
3 - Beaucoup plus modestement, quelques articles de vulgarisation « orientés OM », sur mon site radio <http://f6fqx.chez-alice.fr/ >:
3a – Quelques aspects mathématiques de la théorie de la relativité (mars 2012).
3b - Les quatre formules magiques du professeur Maxwell (Radio-REF, mars 1991).
3c - Ondes et électrons ont bien changé en cent ans (Radio-REF, avril 2003).
3d - Champs et potentiels, deux approches de la théorie électromagnétique (3ème partie : théorie de la relativité et ondes électromagnétiques) (décembre 2005).