

Titre (*français*) : Les destins liés des théories et des systèmes radioélectriques.

Title (*English*): The linked destiny of theory and radio-electric systems.

Auteur : Pierre Fuerxer

Ingénieur de l'armement, Ancien adjoint militaire au directeur de CNET.

Mots clés : *Ondes, gravitation, théories, expériences*
 Waves, gravitation, theories, experiments

Résumé:

Dans le passé, les scientifiques avaient construit leurs théories sur les résultats d'expériences rustiques. Ceci apparaît clairement à la lecture de la plupart des articles décrivant les expériences cruciales réalisées au 20^e siècle.

En rêvant à de nouveaux systèmes, des chercheurs ont joué un rôle décisif dans le développement de la radioélectricité. Ainsi, les besoins de l'industrie des télécommunications ont largement contribué au développement des théories et des technologies électroniques. Très souvent, les travaux théoriques ont été conduits par des entrepreneurs espérant conquérir un marché solvable.

Aujourd'hui, les GNSS ont atteint un marché de masse. Est-il possible d'utiliser leurs constellations de satellites pour réaliser des expériences susceptibles d'améliorer nos connaissances en géophysique et en cosmologie ?

Abstract:

In the past, scientists based their theories on behalf of very crude experiments. This is clearly attested by the analysis of the papers describing most of the 20th century decisive experiments.

Dreaming to new systems, scientists played a decisive role in the development of the radio electric science. The needs of the telecommunication industry contributed widely to the development of theories and electronic technologies. Very often, and especially in the radio electric field, theoretical works have been driven by managers expecting a solvable market.

Now, GNSS is a mass market. Is it possible to use their satellites constellations to build new experiments able to enhance our knowledge in geophysics and cosmology?

Le rôle important du hasard :

Généralement, les scientifiques conçoivent les expériences dans le but de confirmer leurs options théoriques. La lecture du mémoire de Miller publié en 1933 illustre parfaitement cette attitude [1]. L'expérience était très rustique : la source lumineuse était une lampe à acétylène, les relevés faits au dixième de frange par des opérateurs. Bien que ses résultats aient été 400 fois inférieurs à ses prévisions, Miller a pensé avoir confirmé l'existence de l'Ether, et le déplacement de la Terre par rapport à ce milieu hypothétique.

De même, le 15 avril 1928, Esclangon [2] publie un article dans lequel il décrit les déviations optiques observées à Strasbourg avec une lunette astronomique. Ne disposant pas des moyens de calcul actuels, il pensait avoir observé une période d'un jour sidéral. Ces résultats n'ayant pas été confirmés à Paris avec un télescope, cette observation a été attribuée à des erreurs expérimentales. Une analyse "spectrale" des 154 mesures publiées par Esclangon conduit à des résultats surprenants.

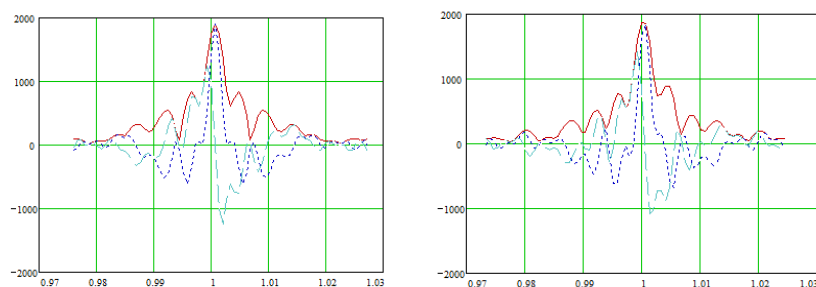


Figure 1 : A gauche : analyse des résultats. A droite : test sur la période d'un jour solaire.

Il est aujourd'hui facile de faire une analyse de ses mesures (figure 1). Il existe bien une périodicité mais sa valeur était d'un jour solaire. Enfin, le traitement étant ambigu, la période des fluctuations pourrait tout autant être de 12 heures que de 24 heures.

Est-on certain que les anomalies rapportées par Miller et Esclangon résultent de causes fortuites, en particulier des variations de température ou de pression atmosphérique ? Toutes les théories ayant un domaine de validité limité, est-on certain que la contraction de Lorentz est strictement celle qui assure la conservation de la vitesse de la lumière ? La théorie de la relativité générale prédit une courbure des rayons lumineux. Est-on certain que l'influence gravitationnelle du Soleil et la Lune ne peuvent pas expliquer leurs résultats ? Enfin, l'entraînement des ondes par les milieux diélectriques ne pourrait-il pas correspondre à la formule de Fresnel ?

Souvent, les scientifiques pensent qu'une validation expérimentale est la preuve d'une théorie. En fait, les mêmes faits peuvent souvent être décrits par plusieurs théories. L'optique est un domaine dans lequel nous acceptons d'utiliser, au cas par cas, les théories les plus aptes à l'étude d'un dispositif particulier. Qu'un phénomène puisse être décrit par une théorie n'invalide pas les autres approches, lorsqu'elles conduisent à des résultats identiques, indiscernables dans la pratique, ou même d'une précision suffisante.

Considérons l'expérience de William Bertozzi [3]. Son but était de vérifier la formule donnant l'énergie d'un électron en fonction de sa vitesse. Comme dans les cas précédents, cette expérience a été faite alors que la technologie électronique était encore très rudimentaire. Les mesures de vitesse se faisaient à l'aide de photos d'un écran d'oscilloscope !

Les résultats de William Bertozzi tiennent dans une liste de cinq mesures. Sur la figure 2, les croix correspondent aux quatre premières mesures de la vitesse d'un électron en fonction du rapport k de son énergie cinétique à son énergie au repos.

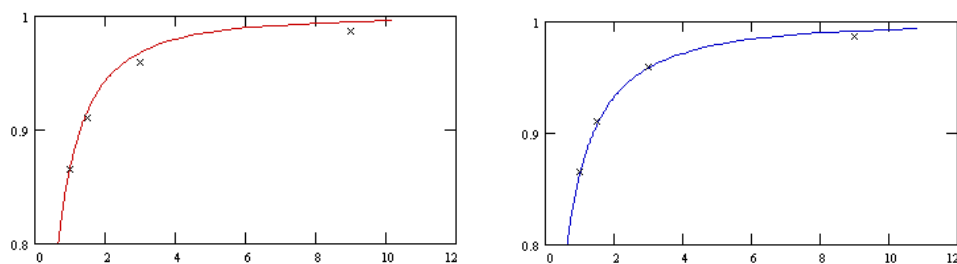


Figure 2 : A gauche : Formule relativiste. A droite : variante possible.

Les résultats obtenus par William Bertozzi peuvent être calculés par la formule relativiste, mais également en faisant les hypothèses suivantes:

- L'énergie de l'électron au repos se partage en parties égales entre sa masse mécanique et l'énergie de son champ électromagnétique calculée selon les formules de l'électromagnétisme classique.
- Lorsqu'il est mobile, l'énergie de son champ électromagnétique est calculée en faisant appel à une représentation ondulatoire.

Nous obtenons ainsi une autre expression de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse de l'électron (figure 2). Quel aurait été le choix de William Bertozzi s'il n'avait pas connu la formule relativiste ?

Les centrales de navigation inertielle utilisent des gyromètres LASER. L'expérience a montré que ces dispositifs présentent une plage aveugle dans laquelle ils ne détectent pas leur rotation. Cette anomalie a été prise en compte en introduisant artificiellement une rotation périodique de ces dispositifs. Nous avons compris que ce défaut provient de la rétrodiffusion des miroirs qui introduit un couplage entre les deux ondes contrarotatives. Que se serait-il passé si l'expérience de Michelson et Gale [4] avait échoué en 1925 ? Aurait-on tenté de réaliser des gyromètres LASER ?

Une nécessité : conserver des archives précises :

La crédibilité de la physique suppose que nous soyons certains de ses bases expérimentales. Il est donc nécessaire que les données brutes soient conservées de telle sorte que nous puissions vérifier les protocoles expérimentaux et les traitements de données associés. Les physiciens de la première moitié du 20^e siècle l'ont fait. Aujourd'hui, les possibilités offertes par les réseaux informatiques devraient faciliter grandement le travail important que représente la constitution de ces archives.

Grâce à la technologie moderne, aux LASERS et aux nouveaux moyens de calcul, les étudiants devraient pouvoir refaire les expériences qui sont à la base de nos théories, en réaliser de nouvelles qui n'étaient pas faisables au 20^e siècle, en diffuser largement les résultats bruts à la communauté scientifique et enfin leurs conclusions. Ceci devrait être fait pour l'ensemble des programmes de recherche nationaux et internationaux, mais aussi pour les données collectées de façon non intentionnelle par ces grands programmes.

Aujourd'hui, des géolocalisations d'une précision encore inimaginable lors du lancement des grands programmes de localisation par satellites ont été obtenues.

L'analyse des irrégularités apparaissant dans les orbites des satellites pourrait-elle conduire à des découvertes en géophysique? La géolocalisation pourra-t-elle apporter une révolution dans notre perception de l'espace-temps, puis de la cosmologie et finalement améliorer radicalement notre compréhension de l'univers?

Les capacités de traitement numérique des données dont nous disposons aujourd'hui sont sans commune mesure avec celle dont disposaient les physiciens au 20^e siècle. Elles nous permettent même de traiter des données échantillonnées de façon irrégulière ou aléatoire.

L'accès aux données internes des grands programmes internationaux permettrait à notre communauté scientifique d'exploiter les informations inconsciemment collectées par les systèmes de géolocalisation. Pourquoi les responsables de ces systèmes ne rendraient-ils pas publiques ces données, y compris les anomalies éventuellement observées dans les trajectoires des satellites ?

Deux exemples significatifs :

Conserver des archives est utile, à la condition qu'elles puissent être exploitées par nos successeurs. Considérons, sans prendre parti, la polémique qui a suivi la publication des résultats de l'expérience OPERA et le document publié en 2011 par le CERN, toujours présent sur INTERNET.

Ce document de synthèse sur l'expérience OPERA donne de nombreux détails sur le dispositif expérimental, et sur les équipements électroniques utilisés. Il était difficile de mesurer le temps d'arrivée d'une impulsion de 10 μ s avec une précision de l'ordre de 1 ns. En revanche, il manque un exposé permettant à un étudiant de l'an 2100 de comprendre réellement ce qui a été fait : Un schéma de principe clair, les hypothèses implicitement retenues... Cet étudiant saura-t-il si les durées sont exprimées en temps légal actuel ou en temps atomique, et dans quel repère sachant que le synchronisme dépend de celui-ci...

Malgré leurs points obscurs, les documents relatifs aux résultats de VIRGO sont, de ce point de vue, bien plus utiles. La détection quasi miraculeuse d'un événement cosmique rare, confirme la nature ondulatoire de la gravitation. Ceci est un providentiel coup de pouce de la nature. Pour autant, l'analyse de cet interféromètre complexe sera-t-elle convaincante pour les étudiants des générations futures ?

Le rôle fondamental des applications opérationnelles :

La physique des radioélectriciens s'est développée sur la base de leurs seuls besoins. Ils ont mis au point des amplificateurs paramétriques sans avoir recours aux notions quantiques. Pour eux, théorie et technologie n'ont pas été des fins en soi, mais les moyens de construire les briques nécessaires à la réalisation des systèmes qu'ils avaient imaginés. Ils ont parfois fait des erreurs théoriques, par exemple dans l'étude de la modulation, mais l'expérience a eu le dernier mot.

Les multi-trajets ont longtemps semblé devoir limiter de façon radicale les performances des systèmes radioélectriques. Les radioélectriciens ont donc développé des traitements de signaux radicalement nouveaux rendus possibles par les progrès de la technologie numérique. Les multi-trajets sont devenus une richesse et ont parfois été introduits volontairement (par exemple dans le système de radiodiffusion DAB). Là encore, les radioélectriciens ont apporté une contribution originale.

Principe de relativité ou théorie de la relativité ?

Les théories physiques que nous utilisons ont été construites sur la géométrie euclidienne, base mathématique de tous nos raisonnements. Nous parlons de corrections relativistes et considérons implicitement la position, la vitesse et l'accélération des mobiles par rapport à un repère "absolu", choisi en fonction de critères propres à nos systèmes. Le meilleur repère n'est-il pas celui dans lequel nous travaillons ? Notre approche a été d'étudier séparément chaque élément en tenant compte de leur environnement (Mouvement par rapport au repère "privilegié" choisi, champ de gravitation...). Ensuite, nous assemblons ces modules.

Cette démarche pragmatique n'est-elle pas totalement conforme au principe de relativité ? Comment pourrions-nous construire une théorie prenant en compte toutes les perturbations des systèmes de localisation si nous ne réhabilitons pas, faute de repère et de temps absolus, la notion de repère privilégié ?

Les concepteurs des interféromètres LIGO et VIRGO supposent implicitement leur appareils indéformables et immobiles par rapport au milieu de propagation des ondes gravitationnelles. C'est bien ce postulat qui leur permet d'imaginer pouvoir détecter des fluctuations gravitationnelles. Par ailleurs, les très grandes dimensions de ces instruments, choisies de façon à privilégier la sensibilité, imposent la réalisation d'asservissements qui éliminent les vibrations du sol, et en même temps l'effet de toute variation gravitationnelle basse fréquence.

Il est naturel de penser que tous nos systèmes terrestres et satellitaires sont soumis à un champ de gravitation lentement variable, modifié par les mouvements relatifs du Soleil, de la Lune et de la Terre.

Quelle que soit l'approche théorique retenue, la courbure gravitationnelle des rayons lumineux et la vitesse des mobiles par rapport au repère géocentrique ne peuvent qu'imposer des corrections locales.

Pendant plus d'un siècle, des scientifiques n'ont cessé de réaliser, souvent avec des moyens très limités, des expériences qui leur semblaient contredire notre usage actuel du principe de relativité. Je citerai, à titre d'exemples, les travaux d'Héctor Múnera [5] et les premiers résultats de Vincent Morin [6]. Qui peut raisonnablement affirmer qu'une loi de la physique valable dans un élément de volume $dx.dy.dz.dt$, valide dans un système d'unités locales, est également valide à l'échelle macroscopique ? Qui peut être certain de raisonner juste dans un espace ad-hoc non-euclidien construit sur le raccordement de ces éléments de volume ?

Le principe de réalité :

L'utilisation des systèmes de géolocalisation est si naturelle que leurs utilisateurs peuvent en oublier les inévitables limitations. La précision exigée pour les applications professionnelles ou scientifiques sera de plus en plus grande. Les systèmes satellitaires prennent déjà en compte les fluctuations de l'ionosphère. Au fur et à mesure de l'évolution des besoins, il faudra prendre en compte les marées terrestres, la forme exacte du géoïde, les inhomogénéités du champ de gravitation terrestre...

Pour prendre en compte toutes les perturbations des systèmes de location, les corrections sont et vont continuer à être faites par différentes approches. Lois empiriques, asservissement, modélisation fines...

Loin des querelles philosophiques, nous adopterons, au cas par cas, les théories les plus adaptées à la résolution des problèmes concrets. Ne faisons-nous pas des approximations lorsqu'elles n'influent pas sensiblement sur le résultat final ? La diversité des théories et des représentations imaginées est une richesse. Elle seule permet l'évolution de la science.

Comme au 18^e siècle, la curiosité peut pousser des intellectuels à échafauder des théories. Au cours du 20^e siècle, le développement de l'électromagnétisme a été largement dû à des "amateurs de génie", motivés par la recherche d'applications concrètes, et visant un marché qu'ils pensaient solvable. En cherchant à offrir des services, ils ont été à l'origine du RADAR et d'immenses progrès scientifiques : La théorie des tubes électroniques, les techniques hyperfréquences, les antennes... Plus récemment, les techniques d'imagerie hyperfréquence, développées pour la discrétion RADAR, ont fait progresser notre connaissance des interactions entre les ondes et les objets qui nous entourent.

Aujourd'hui, la géolocalisation est devenu un marché de masse. Des précisions encore inimaginables lors du lancement des grands programmes de localisation par satellites ont été obtenues. Ces systèmes vont-ils être à l'origine de nouveaux progrès scientifiques ?

D'extraordinaires retombées scientifiques potentielles:

En 2011, au cours des journées scientifiques sur " les Radiotélescopes du futur", je posais une question à mes yeux fondamentale : La physique du 21^e siècle sera-t-elle ondulatoire? La confirmation de l'existence d'ondes de gravité, dont les astronomes avaient supposé l'existence il a bien longtemps, vient étayer ma conviction. La physique du 21^e siècle sera ondulatoire !

Grâce à cette approche ondulatoire, les champs de gravitation fixes et mobiles deviendront, comme en électromagnétisme, des combinaisons de solutions particulières d'équations différentielles. Les interactions entre la gravitation et les ondes électromagnétiques pourront alors être décrites en introduisant des non linéarités dans les équations de Maxwell.

Dans un système quasi isolé comme le système Solaire, il sera possible de construire un repère euclidien dans lequel étudier les interactions entre le Soleil, les planètes et leurs satellites. Nous pourrions déterminer avec une précision accrue les trajectoires des satellites appartenant à nos systèmes de géolocalisation.

Nous devons adapter à la gravitation les méthodes ondulatoires adoptées en acoustique aérienne ou sous-marine pour prendre en compte des variations locales de la vitesse des ondes. Evidemment, cette transposition ne sera pas facile à faire. Pour les acousticiens, la propagation des ondes électromagnétiques était instantanée. Ils pouvaient les utiliser pour construire le repère dont ils avaient besoin. Nous ne disposons que d'ondes électromagnétiques dont la propagation dépend du champ de gravitation. Comment ferons-nous pour construire ce nouveau repère ?

Nos systèmes de localisation visent à rendre le meilleur service possible à nos clients. Notre objectif prioritaire est, et doit rester, d'améliorer leurs performances. La modélisation la plus précise possible des erreurs est donc nécessaire. En fin de compte, les théories et les systèmes de radiolocalisation seront jugés sur la base du service opérationnel rendu, mais aussi sur la valeur de leur contribution au progrès scientifique. L'identification des différentes causes d'erreur restera une préoccupation de la communauté scientifique. La modélisation de plus en plus fine des irrégularités apparaissant dans les orbites des satellites pourra probablement conduire à des découvertes en géophysique.

Lorsque j'étais le dernier adjoint militaire au directeur du CNET, et malgré la réalisation par l'équipe de Lannion de sondeurs ionosphériques modernes, la contribution française au réseau mondial de sondeurs ionosphériques a pris fin. Pourquoi ne pas chercher à utiliser les constellations de satellites pour continuer l'étude et l'observation de l'ionosphère ? Des récepteurs GPS modifiés, constitueraient une antenne lacunaire de très grandes dimensions. Associés à INTERNET, ils pourraient collecter des informations très utiles. Nous avons en effet montré que l'analyse des 154 mesures d'Esclangon permet d'obtenir des résultats intéressants. Un réseau de 1000 récepteurs de type GPS collecterait en une année plus de 10^9 mesures qui constitueraient une base de données essentielle à la conduite de nombreuses recherches.

La participation des gestionnaires des grands programmes internationaux à cet effort de recherche serait assurée au titre d'un programme d'amélioration du service des GNSS baptisé par exemple GNSSIP (GNSS Improvement Program).

Notre objectif serait la réalisation d'une antenne lacunaire 3D, de dimensions mille fois plus grandes que l'interféromètre VIRGO. Il pourrait être baptisé GWSA (Gravitation Waves Spatial Antenna).

Nos laboratoires disposeraient alors des données essentielles collectées par les récepteurs fixes, mais aussi des données internes des grands programmes internationaux. Cette antenne 3D, en s'affranchissant des limites de nos systèmes terrestres, permettrait de rêver à des observations aujourd'hui impossibles.

En contribuant au développement de nombreux services, la géolocalisation a apporté une révolution dans les usages. Elle nous permettra certainement d'affiner notre perception de l'espace-temps, puis d'améliorer radicalement notre compréhension de l'univers.

- [1] The Ether-Drift Experiment and Determination of the Absolute Motion of the Earth, *Reviews of Modern physics*, July 1933, volume 3.
- [2] Dissymétries optiques de l'espace, *Journal des observateurs*, avril 1928.
- [3] Article publié par W. Bertozzi dans : *American Journal of Physics*, Volume 32 (1964).
- [4] A. A. Michelson et Henry G. Gale, « *The Effect of the Earth's Rotation on the Velocity of Light, II.* », *Astrophysical Journal*, vol. 61, avril 1925
- [5] Héctor A. Múnera, "Absolute velocity of earth from our stationary Michelson-Morley-Miller experiment at CIF, Bogota, Colombia", poster presented at *Physical Interpretations of Relativity Theory PIRT2017*, Bauman Moscow State Technical University, Julio 3-6, 2017 .
Should the Laws of Gravitation Be Reconsidered? publié à Montréal (2011).
- [6] Déviations lumineuses d'Allais-Esclangon, un indice expérimental concernant les relations de la gravitation et de l'électromagnétisme ? Vincent Morin vincent.morin@univ-brest.fr, Pierre Fuerxer pierre.fuerxer@wanadoo.fr, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, Volume 33, no 3-4, 2008.