

L'interprétation cosmique du gyroscope de Foucault

Michel Mizony(*)

« ...espace et temps sont les cadres a priori de toute description de notre expérience. »

E. KANT

De la terre aux étoiles, des expériences de Foucault sont là, et signent un tournant : avec son pendule, c'est la terre qui tourne sur elle-même ; avec son gyroscope, plus d'effet de latitude ; avec son daguerréotype, la première photo du soleil ; avec ses miroirs tournants, une mesure très précise de la vitesse de la lumière. On lui doit aussi des améliorations considérables concernant les télescopes, etc.

Curieusement, il est très souvent dit dans la littérature, que le fait que le plan du pendule de Foucault, ou l'axe de son gyroscope, s'orientent vers les galaxies lointaines reste inexpliqué, voire incompréhensible. Dans cet atelier, nous rappellerons la signification cosmique déjà donnée par le russe Vladimir Fock il y a 50 ans. La persistance de l'incompréhension vient, me semble-t-il, de la difficulté à saisir simplement le rapport entre un domaine phénoménal de la physique et sa (ses) modélisation(s) mathématique(s). Dans notre exemple le domaine phénoménal est celui de la gravitation, et deux modélisations sont la théorie de Newton d'une part et la relativité générale d'Einstein d'autre part.

1. Foucault, ses expériences, sites pour des TPE

« L'expérience ne peut décider entre Euclide et Lobatchevski. Les expériences ne nous font connaître que les rapports des corps entre eux ; aucune d'elles ne porte, ni ne peut porter, sur les rapports des corps avec l'espace, ou sur les rapports mutuels des diverses parties de l'espace. »

H. POINCARÉ

Il n'est pas question de décrire les très nombreuses expériences réalisées au XIX^e siècle par Léon Foucault. Par contre, voici des extraits de la page réalisée sur le site <http://www.obspm.fr/~expositions/Foucault/niveau2/9savoirPlus.html> de l'observatoire de Paris :

Pour en savoir plus (documents pédagogiques)

Cette page vous donne accès à des fiches qui permettent un premier approfondissement des connaissances sur les travaux très variés de Léon Foucault. Nous espérons que ces documents seront utiles non seulement à un public cultivé, mais aussi aux enseignants de physique des lycées, IUFM, IUT et universités, qui pourront y trouver matière pour illustrer leur enseignement.

Laurence Bobis, James Lequeux et William Tobin

(*) IREM de Lyon.

- Chronologie de Foucault
- Le daguerréotype
- Les courants de Foucault
- La nature de la lumière
- La vitesse de la lumière
- La vitesse de la lumière après Foucault
- Le pendule de Foucault
- Le gyroscope
- La rotation de la Terre après Foucault
- Les expériences d'optique
- L'arc électrique
- Le télescope avant Foucault
- Les télescopes de Foucault
- Les télescopes après Foucault
- Héliostats et sidérostats
- Les régulateurs

Pour une description, plus adaptée à des élèves de terminales, de certaines expériences, on pourra aller voir le site : <http://visite.artsetmetiers.free.fr/index.html>.

Ces deux sites me semblent intéressants pour un travail en TPE (maths-physique). Mais, on sait qu'il est difficile pour les élèves de premières et terminales de « mettre un peu de maths » dans leurs sujets de TPE. Il est aussi délicat de savoir ce qu'est une modélisation pour un professeur de sciences, et ceci pour deux raisons principales, à savoir :

- 1- Ce concept (récent, le mot modélisation n'apparaît dans les dictionnaires que vers 1975) commence seulement à être enseigné dans leur formation.
- 2- Le rapport entre les maths et les autres disciplines n'est pas clair et pour cause, les apports essentiels de Kant et de Poincaré, en philosophie des sciences, ayant été « oubliés ».

2. L'expérience du pendule de Foucault

Voici comment l'astrophysicien Trinh Xuan Thuan présente admirablement cette expérience (page 101 dans le livre *L'infini dans la paume de la main*).

« Le physicien Français Léon Foucault voulait démontrer que la Terre tournait sur elle-même. En 1851, dans une expérience restée célèbre et qui est maintenant reproduite dans de nombreux musées des sciences du monde, il attacha un pendule à la voûte du Panthéon, à Paris. Une fois lancé, le pendule a un comportement remarquable : son plan d'oscillation pivote au fil des heures. Si on le lance dans la direction nord-sud, au bout de quelques heures il oscillera dans la direction est-ouest, et si nous étions aux pôles, le pendule ferait un tour complet en exactement 24 heures. À Paris, à cause d'un effet de latitude, le pendule n'accomplit qu'une fraction de tour en une journée.

Pourquoi le plan du pendule pivote-t-il ? Foucault répondit que ce mouvement n'était qu'apparent : le plan d'oscillation du pendule reste fixe et c'est la Terre qui tourne. Ayant mis en évidence la rotation de la Terre, il s'en contenta. Mais la réponse de Foucault était incomplète, car un mouvement ne peut être décrit que par rapport à un repère fixe : le mouvement absolu n'existe pas. Galilée avait déjà compris que : « Le mouvement est comme rien. » Le mouvement n'existe pas en soi, mais relativement à autre chose. La Terre doit « tourner » par rapport à quelque chose qui ne tourne pas. Mais comment trouver ce quelque chose ? Afin de tester l'immobilité d'un point de repère, un astre par exemple, il suffit de lancer le pendule dans sa direction. Si l'astre

est immobile, il restera dans le plan d'oscillation du pendule, dont on sait qu'il est fixe. Si l'astre bouge, il dérivera lentement en dehors du plan. Essayons des objets astronomiques connus, des plus proches aux plus lointains. Si nous orientons le plan de notre pendule vers le Soleil, ce dernier sort perceptiblement du plan d'oscillation après quelques semaines. Les étoiles les plus proches, situées à quelques années-lumière, font de même après quelques années. La galaxie Andromède, située à deux millions d'années-lumière, dérive moins, mais finit par sortir du plan. Le temps passé dans le plan s'allonge et la dérive tend graduellement vers zéro au fur et à mesure que les objets testés sont plus éloignés. Seuls les amas de galaxies les plus lointains, situés à des milliards d'années-lumière, aux confins de l'univers connu, ne dérivent pas par rapport au plan d'oscillation initial du pendule.

– Pourquoi y aurait-il un plan privilégié ?

Il n'y a pas de plan privilégié. Toutes les directions sont équivalentes. Quelle que soit la direction dans laquelle on a lancé le pendule au début, son plan d'oscillation reste fixe, mais pas par rapport aux objets célestes proches, mais par rapport aux amas de galaxies les plus lointains que l'on puisse détecter dans cette direction. La conclusion à tirer de ces expériences est extraordinaire : le pendule de Foucault ajuste son comportement non pas en fonction de son environnement local, mais en fonction des galaxies les plus éloignées, c'est-à-dire de l'univers tout entier, puisque la quasi-totalité de la masse visible de l'univers se trouve non pas dans les étoiles proches, mais dans ces galaxies lointaines. En d'autres termes, ce qui se trame chez nous se décide dans l'immensité cosmique : ce qui se passe sur notre minuscule planète dépend de la totalité des structures de l'univers.

Pourquoi le pendule de Foucault se comporte-t-il ainsi ? On ne connaît pas la réponse pour l'instant. Le philosophe et physicien autrichien Ernst Mach y voyait une sorte d'omniprésence de la matière et de son influence. Selon lui, la masse d'un objet – la quantité qui mesure son inertie, c'est-à-dire sa résistance au mouvement – est le résultat de l'influence de l'univers tout entier sur cet objet. C'est ce qu'on appelle le principe de Mach. Lorsqu'on peine à pousser une voiture, la résistance qu'elle exerce au mouvement émane de la totalité de l'univers. Mach n'a jamais formulé en détail cette influence universelle mystérieuse, qui est distincte de la gravité, et personne n'a su le faire depuis. ... »

3. Que signifie cette expérience ?

1 – Si comme le dit Trinh Xuan Thuan l'expérience de Foucault met en évidence l'aspect qualitatif du principe de Mach, on en connaît l'interprétation dans le cadre de la relativité générale au moins depuis V. Fock (p. 394 du livre *The theory of space, time and gravitation* ; Pergamon Press, London, 1964). Cette expérience montre que pour la compréhension d'un phénomène local, il faut se situer dans un modèle global, ici un modèle d'univers isotrope.

2 – Il est intéressant de noter que cette expérience représente un test sur terre (en laboratoire) d'un aspect de la relativité générale, en l'occurrence celui de travailler avec deux métriques dont celle du modèle global choisi.

3 – Deux concepts posent problème, ce sont la covariance et l'invariance ; il ne faut pas les confondre. Dans cette expérience, les conditions aux limites à l'infini sont

covariantes par rapport à la métrique associée au modèle d'univers et invariantes par rapport à celle décrivant le système.

4 – En d'autres termes, il existe une famille privilégiée de repères, c'est celle des repères comobiles du modèle d'univers choisi. C'est le sens profond de l'expérience du pendule (du gyroscope) de Foucault.

5 – Vous êtes-vous déjà interrogé sur la formulation des noms des tests de la relativité générale ? Ils se nomment : DÉVIATION des rayons lumineux, AVANCE du périhélie de Mercure, RETARD de l'écho radar. Et, dans l'expérience de Foucault, on regarde la déviation du plan du pendule (traduisant la rotation de la Terre), mais plus profondément la FIXITÉ de ce plan par rapport à la métrique d'univers. Ces formulations soulignent à l'évidence la nécessité de travailler avec deux métriques (celle de l'univers choisi et celle du système étudié), et ce que l'on mesure (déviation, retard, avance, fixité) est un ÉCART que l'on attribue souvent à la différence de prédiction entre la théorie de Newton et celle d'Einstein (ce qui est vrai pour l'avance d'un périhélie) ; mais pour les autres (retard, déviation, fixité) ? Cet ÉCART est en fait la différence entre les prédictions associées à ces deux métriques.

6 – Pour achever la compréhension complète de l'expérience du pendule de Foucault, il reste, à ma connaissance, à formaliser l'aspect quantitatif du principe de Mach dans le cadre de la relativité générale, compréhension qui passe par celle de la masse inertielle.

« Consécutivement, et même synchroniquement, on constate de nombreux cas où l'explication scientifique admet plusieurs modèles pour un même domaine phénoménal. Cette pluralité est-elle le signe que nous n'atteignons jamais que des apparences ?

La vérification scientifique, outre son sens trivial d'élimination des illusions et des erreurs immédiatement décelables, consiste donc en une mise à l'épreuve, le plus souvent très médiate, d'un parti pris de représentation de l'expérience. »

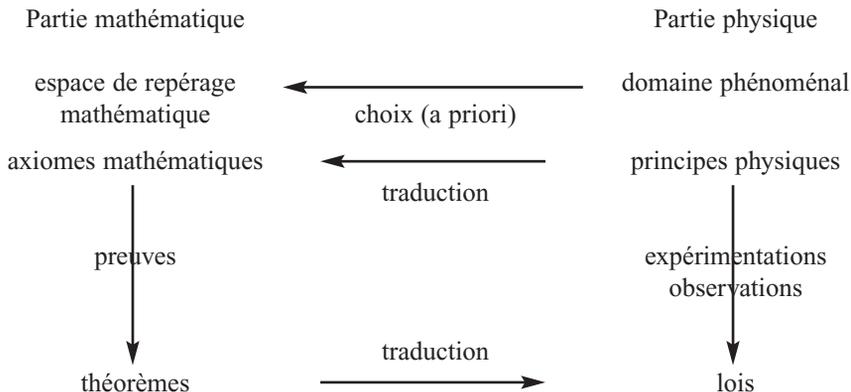
G.-G. GRANGER

4. Sur la modélisation mathématique

J'ai conscience que pour pas mal d'entre vous, je suis rentré dans des explications un peu techniques. En bref le seul point à retenir est le fait que le pendule de Foucault met en évidence une famille privilégiée de repères (en gros ceux qui laissent les galaxies lointaines fixes) dans le cadre de la relativité générale d'Einstein. Or, il existe une croyance (fausse) qui consiste à affirmer que tous les repères sont équivalents dans le cadre de la relativité générale (et donc à se condamner à ne pas comprendre le sens de l'expérience du pendule). Eh oui, il existe des repères « plus égaux que d'autres ». Pour avancer et sortir de l'incompréhension, il nous faut réfléchir au concept de modélisation, en reprenant en particulier des oubliés par la philosophie des sciences : E. Kant, et H. Poincaré dont les apports ont été bien actualisés par G.G. Granger (*La vérification*, O. Jacob, 1992).

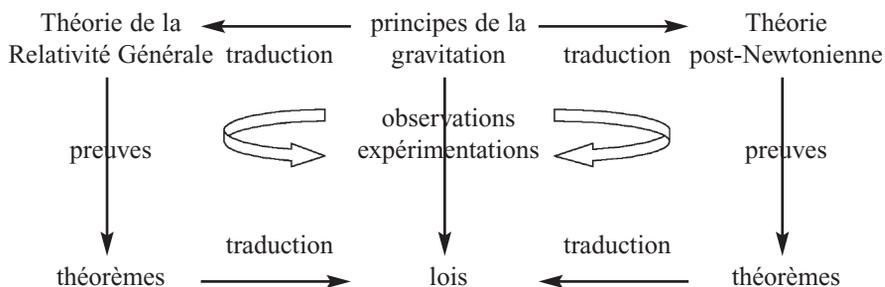
Nous allons illustrer ce concept de modélisation, trop brièvement, par trois schémas.

Schéma d'une **Modélisation** (d'une théorie scientifique)

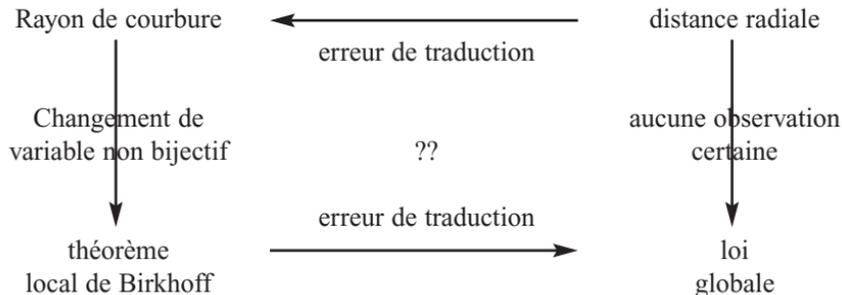


Les flèches où se glissent le plus souvent des erreurs sont celles de « traduction ». La flèche « choix » (au sens Kantien), signifie que l'on indexe les événements du domaine phénoménal par un espace mathématique judicieux, par exemple l'espace de Minkowski ou une variété.

Les équations de la théorie de Newton de la gravitation ne dépendent pas explicitement de la vitesse de la lumière ; prenons ces équations sur l'espace de Minkowski (vitesse de la lumière finie), nous obtenons la théorie post-newtonienne (ou lorentzienne) de la gravitation. Cette théorie est équivalente mathématiquement et observationnellement à la relativité générale d'Einstein. Ces deux théories n'admettent pas le même espace mathématique de repérage et conduisent donc à deux modélisations équivalentes et conceptuellement différentes de la gravitation. C'est un exemple du pluralisme théorique cher à H. Poincaré. La théorie de la relativité générale est et n'est qu'une écriture relativiste et covariante de la vieille théorie de Newton (encore fallait-il le faire, c'est le mérite d'Einstein).



Terminons par un exemple emblématique : le mythe du trou noir. Beaucoup de TPE prennent ce sujet ; il est important de signaler que cette théorie est fautive, comme le disait déjà EINSTEIN (Annal Math., Vol. 40, p. 922-936 (1939)). Ci-dessous le schéma des erreurs, chaque flèche pose problème, en particulier celles de traduction.



Pour en savoir plus sur ce mythe ou sur l'équivalence des théories de Newton et d'Einstein de la gravitation, se reporter au site

<http://igd.univ-lyon1.fr/home/mizony/relatgene.html>

et pour les preuves à mon livre « *La relativité générale aujourd'hui : l'observateur oublié* », Aléas (2003).

Avec ce type de schéma de modélisation, on peut espérer mieux cerner les rapports entre mathématique et physique, et donc mieux « glisser des maths » dans un TPE.

« *La principale source de confusions vient de nos discours qui ne font pas bien la part des choses : ils attribuent trop souvent au temps les propriétés des phénomènes qui s'y déroulent.* »