

LA TERRE TOURNE-T-ELLE VRAIMENT ?

Ernst Mach, le pendule de Foucault et l'origine des forces d'inertie

Plan

1. 1851 : le temps des certitudes
 2. L'espace absolu
 3. Les critiques de Mach
 4. L'interprétation de Poincaré : la Terre tourne-t-elle ?
 5. Einstein et l'origine de l'inertie
 6. Conclusion
-

1. 1851 : le temps des certitudes

Imaginons une nuit parisienne de l'hiver 1851. Dehors, il fait froid et en cette heure avancée de la nuit, les fiacres se font rares dans les rues de la capitale endormie. C'est le moment que choisit l'ingénieur Léon Foucault (1819-1868, illustration ci-contre) pour descendre dans la cave de sa maison, située en plein cœur du 6^e arrondissement parisien. Là, il a fait installer dans les jours qui précèdent un pendule de deux mètres de longueur attaché au plafond par un fil très fin. Pour le mettre en mouvement, le savant doit prendre d'infinies précautions. Une boucle le retient au repos et il faut brûler un fil pour le libérer. C'est également pour éviter les vibrations venues de la rue qu'il a choisi de travailler en pleine nuit. Le pendule lancé, Foucault retient son souffle. Il faut en effet attendre de longues minutes avant que l'incroyable se produise : le plan d'oscillation du mobile se déplace très lentement...



Par cette froide nuit de janvier, à deux heures du matin, Foucault sait qu'il est le premier homme à voir la Terre tourner. Il le note laconiquement dans ses carnets : *" Mercredi, 8 janvier, 2 heures du matin : le pendule a tourné dans le sens du mouvement diurne de la sphère céleste. "* (note manuscrite de Foucault, citée dans le *Recueil des travaux scientifiques*).

Que prouve au juste l'expérience du pendule de Foucault ? Pour le savant français, comme pour ses contemporains, la réponse à cette question ne fait aucun doute : le mouvement du plan d'oscillation du pendule constitue une visualisation directe de la rotation absolue de la Terre (" du mouvement vrai de la Terre dans l'espace absolu ", disait Newton). C'est ainsi que le 3 février 1851, Foucault annonce à l'Académie des sciences que son pendule fournit " *un signe sensible du mouvement diurne du globe terrestre* ". Son mémoire porte d'ailleurs le titre de " *Démonstration physique du mouvement de rotation de la Terre* ".

Quelques jours plus tard, un quotidien s'adresse à ses lecteurs en ces termes : " *Avez-vous vu tourner la terre ? Voulez-vous la voir tourner ? Allez jeudi, et jusqu'à nouvel ordre tous les jeudis suivants, de 10 heures à midi au Panthéon.* " (*Le National*, 26 mars 1851, illustration ci-contre).



Camille Flammarion, célèbre vulgarisateur de l'époque, déclare quant à lui dans son *Astronomie populaire*, un livre très largement diffusé au XIX^e siècle : " *A moins de nier l'évidence, cette expérience démontre invinciblement le mouvement de la Terre* ". En 1902, à l'occasion d'une reproduction en grande pompe de l'expérience au Panthéon, ce même auteur déclarait encore que le pendule de Foucault

" ... était la démonstration pratique, évidente, majestueuse, du mouvement de rotation de notre globe et l'affirmation grammaticale du titre de planète, ou " *astre mobile* ", pour le monde que nous habitons. "

Et il ajoutait :

" Nous sentons que les apparences mondaines ... ne sont que fumée et vanité ..., que ce que nous croyons grand est minusculement petit, ce que nous croyons absolu est essentiellement relatif " .

Flammarion oppose donc les apparences du mouvement diurne du soleil dans le ciel à la réalité de la rotation de la Terre sur elle-même. Le pendule de Foucault démontre de manière indubitable que c'est la Terre qui se déplace, et que le mouvement apparent du soleil n'est que relatif. Le ton est

assuré, presque triomphant. Il s'agit en effet de solder le douloureux débat qui avait opposé autrefois Galilée à l'Eglise, et avait entraîné la condamnation des idées héliocentriques. La victoire revient donc à la science par KO, ce dont chacun peut maintenant se convaincre en observant le majestueux mouvement du pendule du Panthéon.

Mais Flammarion ne se rendait pas compte que son affirmation sur la relativité des choses et l'illusion des apparences pouvait très bien se retourner contre cette " preuve " elle-même. Au tournant du XX^e siècle, pour certains physiciens, l'interprétation du mouvement du pendule de Foucault n'est plus si évidente, la rotation de la Terre sur elle-même non plus. Les critiques les plus abouties et les plus fécondes contre le caractère absolu de ce mouvement allaient venir du physicien autrichien Ernst Mach (1838 - 1916). Elles devaient avoir une influence importante sur le fondateur de la théorie de la Relativité Générale, Albert Einstein. Mais pour comprendre ces idées, nous devons d'abord revenir sur les postulats de la mécanique classique.

2. L'espace absolu

En fondant la mécanique classique, Newton postule l'existence d'un temps et d'un espace absolus. Ce dernier est d'ordre mathématique, immuable et inaccessible aux sens :

" Il faut distinguer le temps, l'espace, le lieu et le mouvement, en absolus et relatifs, vrais et apparents, mathématiques et vulgaires. ... L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile. L'espace relatif est cette mesure ou dimension mobile de l'espace absolu, laquelle tombe sous nos sens par sa relation aux corps, et que le vulgaire confond avec l'espace immobile. " (I. Newton, *Principia*, p. 8).

Les problèmes que soulèvent cette définition n'échappent pas à Newton, qui, à la suite de critiques formulées par Leibniz, admit que l'idée d'un espace absolu est une notion abstraite, métaphysique, et qu'il faut l'assimiler à l'idée de Dieu. Sa meilleure " visualisation " serait pour nous d'ordre mathématique : un trièdre cartésien *Oxyz*, avec une origine immobile.

Mais Newton accompagne cette définition controversée de l'espace absolu d'une distinction entre mouvement absolu et mouvement relatif, qui semble, elle, devoir entraîner l'adhésion des plus sceptiques. Il considère pour cela l'exemple célèbre d'un liquide placé dans un seau en rotation :

" Supposons qu'on suspende un seau à une corde très longue et qu'on lui fasse décrire continuellement un orbe jusqu'à ce que la corde soit complètement raidie par la torsion ; puis qu'on le remplisse d'eau et qu'on tienne l'ensemble au repos ; qu'on lui imprime alors par une force soudaine un mouvement contraire en orbe et qu'en faisant se relâcher la corde, on laisse ainsi l'ensemble persister longtemps en ce mouvement ; la surface de l'eau sera tout d'abord

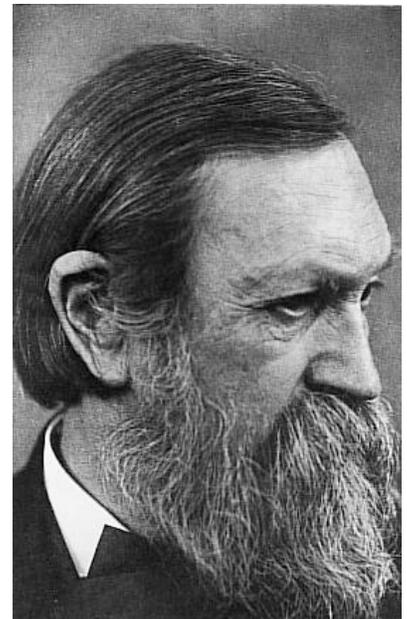
plane, comme elle l'était dans le vase au repos. Mais après que le vase, en imprimant peu à peu une force à l'eau, a fait que l'eau aussi se met à tourner sensiblement, celle-ci s'éloigne peu à peu du centre du vase et monte jusqu'à ses parois en devenant concave (comme j'en ai fait l'expérience). ... Cette montée sur les parois du vase révèle l'existence d'un effort pour s'éloigner de l'axe du mouvement et c'est pas cet effort que l'on connaît et mesure le mouvement circulaire vrai et absolu de l'eau qui, ici, est entièrement contraire au relatif." (I.Newton, *Principia*).

Newton propose donc un critère, l'absence ou non de forces centrifuges (on parlera plus tard de forces d'inertie) permettant de distinguer mouvement absolu et mouvement relatif. En dernier recours, l'étude du déplacement de tout mobile par rapport à l'espace absolu détermine son mouvement absolu. Pour étudier un mouvement complexe, comme par exemple la déviation des projectiles vers l'Est du fait de la rotation de la Terre, les mécaniciens écriront donc d'abord les lois du mouvements dans l'espace absolu. Le mouvement apparent s'en déduira alors par un changement de référentiel approprié. C'est ainsi que procède Poisson (1781-1840) dans un mémoire paru en 1837, qui servira de point de départ à l'étude théorique du pendule de Foucault.

3. Les critiques de Mach

Le physicien autrichien Ernst Mach (1838-1916, illustration ci-contre) a d'abord formulé ses critiques dans un court texte avant de les reprendre dans son ouvrage majeur, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* (1883, traduction française *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, 1904). Mach semble d'abord abonder dans le sens de Newton puisqu'il reprend la distinction classique entre cinématique et dynamique, en considérant l'exemple de la rotation de la Terre :

" Il semble que Newton ait fondé sur des raisons solides sa distinction entre mouvement absolu et mouvement relatif. Si la terre est animée d'une relation sic *absolue* autour de son axe, il s'ensuit que des forces centrifuges s'y manifestent, qu'elle est aplatie, que l'accélération de la pesanteur diminue à l'équateur, que le plan du pendule de Foucault tourne, etc. Tous ces phénomènes disparaissent si la terre est au repos et si les corps célestes sont animés d'un mouvement absolu tels que la même rotation *relative* en résulte. " (p. 225).



Mais Mach va continuer en réfutant la distinction entre mouvement absolu et mouvement relatif. En effet, l'expérience ne permet pas d'accéder à l'espace absolu : " *Il en est en réalité ainsi si nous prenons a priori l'espace absolu pour point de départ ; mais en restant sur le terrain des faits, on ne connaît rien d'autre que l'espace et le mouvement relatifs* " (p. 225). Pour lui, les systèmes de Ptolémée et de Copernic sont donc équivalents :

" Ces deux conceptions sont également *justes* ; la seconde n'est que plus simple et plus *pratique*. L'univers ne nous est pas donné *deux fois*, d'abord avec une terre au repos, puis avec une terre animée d'une rotation, mais bien *une fois*, avec ses mouvements relatifs seuls déterminables. Il est donc impossible de dire comment seraient les choses si la terre ne tournait pas. " (p. 225).

Ce paragraphe, qui résume bien les idées philosophiques de Mach, semble avoir été oublié par nombre de ses commentateurs, qui ont fait de ce physicien le promoteur d'idées vagues et absolument invérifiables (c'est par exemple le cas du physicien américain Richard Feynman). Au contraire, Mach s'élève ici contre les expériences de pensée qui ne peuvent être réalisées. Cet autre paragraphe, dans lequel Mach reprend l'expérience du seau décrite par Newton, va dans le même sens :

" L'expérience du vase rempli d'eau et animé d'un mouvement de rotation nous apprend que la rotation relative de l'eau par rapport au vase n'éveille pas de forces centrifuges apparentes, mais que celles-ci sont éveillées par son mouvement relatif par rapport à la masse de la terre et aux autres corps célestes ; elle ne nous apprend rien de plus. Personne ne pourrait dire ce que l'expérience aurait donné si la paroi du vase avait été rendue plus épaisse et plus massive, jusqu'à avoir une épaisseur de plusieurs lieues. Nous n'avons devant nous qu'une expérience unique et nous avons à la mettre en accord avec l'ensemble des faits qui nous sont connus, mais non pas avec les fictions que l'on imagine " (p. 225).

Mach veut débarrasser la science des idéologies, c'est-à-dire des idées qui ne peuvent être prouvées par l'expérience. C'est cette position antimétaphysique qui l'amène à rejeter les notions d'espace et de mouvement absolus. On ne peut déterminer expérimentalement que des mouvements relatifs. Cela vaut pour la cinématique et pour la dynamique.

" Une rotation par rapport aux *étoiles fixes* fait naître dans un corps des forces d'éloignement de l'axe ; si la rotation n'est pas relative aux étoiles fixes, ces forces d'éloignement n'existent pas. Je ne m'oppose pas à ce qu'on donne à la première rotation le nom d'*absolue* pourvu que l'on n'oublie pas qu'elle n'est autre qu'une rotation *relative* par rapport aux *étoiles fixes*. Pouvons-nous fixer le vase d'eau de Newton, faire ensuite tourner le ciel des étoiles fixes, et

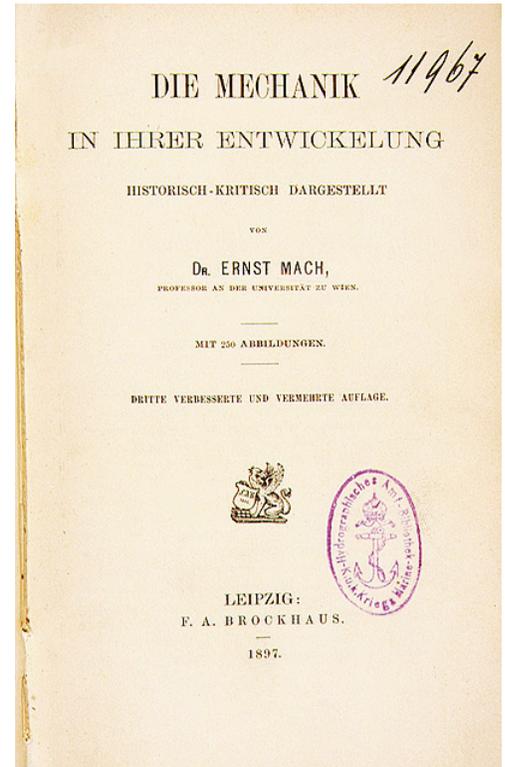
prouver alors que ces forces d'éloignement sont absentes ? Cette expérience est irréalisable, cette idée est dépourvue de sens, car les deux cas sont indiscernables l'un de l'autre dans la perception sensible. Je considère donc ces deux cas comme n'en formant qu'un seul et la distinction qu'en fait Newton comme illusoire " (p. 231).

Ce que souligne Mach avec justesse, c'est la profonde incompréhension que nous avons des forces d'inertie. A quoi sont-elles dues ? L'absence de réponse à cette question leur enlève toute pertinence pour trancher entre mouvement apparent et mouvement relatif. Alors que les physiciens interprètent les forces de la nature en termes d'interactions (gravitationnelles, électrostatiques, etc.), l'absence d'une telle description pour les forces d'inertie, qui ne sont après tout que des jeux d'écriture dans les équations, fait qu'aucune approche ne peut être privilégiée, contrairement à ce que pensait Newton. Les forces centrifuges qui apparaissent dans le seau en rotation peuvent provenir soit d'une rotation de celui-ci par rapport aux étoiles fixes, soit d'une rotation du ciel dans sa totalité autour du seau immobile. Nous n'avons aucun moyen de trancher entre ces deux descriptions, car nous ne comprenons pas l'origine des forces en présence. De plus, en ce domaine, toute expérience est irréalisable, et nous devons donc renoncer à distinguer mouvement absolu et mouvement relatif.

Mais Mach va plus loin encore, puisqu'il propose une interprétation des forces d'inertie en terme d'interaction. L'origine de l'inertie, ce serait une interaction entre les masses étudiées au laboratoire et l'ensemble des masses de l'univers. En effet, si l'on conservait la Terre telle quelle et si l'on supprimait tout le reste de l'univers, parler de rotation n'aurait plus aucun sens puisqu'il n'y aurait plus de référent extérieur à la Terre. Dans ce cas, les forces d'inertie disparaîtraient. Et le plan du pendule de Foucault ne tournerait plus...

Dans cette interaction supposée, toutes les masses doivent être prises en compte, comme le précise Mach lui-même : " *Je n'ai pas supposé que seules les masses éloignées, et non aussi les masses rapprochées, participent à la détermination de l'accélération d'un corps ; je ne parle que d'une influence indépendante de la distance "* (p. 231).

L'idée d'une interaction entre les mouvements locaux et l'ensemble de l'univers a été appelée, à la suite d'Einstein, " principe de Mach " .



4. L'interprétation de Poincaré : la Terre tourne-t-elle ?

C'est au mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912, illustration ci-contre) que l'on doit la saisissante image d'une Terre perpétuellement recouverte de nuages, et l'interprétation de l'expérience du pendule de Foucault dans ce cadre hypothétique :



“ Si le ciel était sans cesse couvert de nuages, si nous n'avions aucun moyen d'observer les astres, nous pourrions, néanmoins, conclure que la terre tourne ; nous en serions avertis par son aplatissement, ou bien encore par l'expérience du pendule de Foucault. Et pourtant, dans ce cas, dire que la Terre tourne, cela aurait-il un sens ? S'il n'y a pas d'espace absolu, peut-on tourner sans tourner par rapport à quelque chose, et d'autre part comment pourrions-nous admettre la conclusion de Newton et croire à l'espace absolu ? ” (H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*).

Mais Poincaré va encore plus loin, au risque d'une provocation pas toujours comprise par ses contemporains :

“ Cela n'empêche pas que l'espace absolu, c'est-à-dire le repère auquel il faudrait rapporter la Terre pour savoir si réellement elle tourne, n'a aucune existence objective. Dès lors, cette affirmation : “ la Terre tourne ”, n'a aucun sens, puisqu'aucune expérience ne permettra de la vérifier ; puisqu'une telle expérience, non seulement ne pourrait être réalisée, ni rêvée par le Jules Verne le plus hardi, mais ne peut être conçue sans contradiction ; ou plutôt ces deux propositions : “ la Terre tourne ”, et “ il est plus commode de supposer que la Terre tourne ”, ont un seul et même sens ; il n'y a rien de plus dans l'une que dans l'autre. ” (H. Poincaré, *La science et l'hypothèse*).

On trouve ici des idées très proches de celles de Mach sur la relativité du mouvement. Les remarques de Poincaré, pointant les problèmes posés par le mouvement de la Terre, venaient confirmer des doutes nées des expériences réalisées de 1881 à 1887 par Albert Michelson. Celui-ci, utilisant un dispositif interférométrique, n'était pas parvenu à mettre en évidence le “ vent d'éther ” attendu du fait de la rotation de la Terre. La Terre tournait-elle vraiment ?

5. Einstein et l'origine de l'inertie

Les idées de Mach vont trouver un écho chez A. Einstein (1879-1955), et celui-ci ne se privera pas de rappeler sa dette envers le physicien autrichien. En 1913, alors qu'il est en train de mettre la dernière main à la théorie de la *relativité générale*, Einstein écrit une lettre à Mach pour souligner l'influence que ce dernier a exercé sur sa pensée :

“ (1) Si l'on accélère une coquille massive S , alors une masse contenue dans cette coquille sera soumise à une accélération d'entraînement. (2) Si l'on fait tourner la coquille par rapport aux étoiles fixes autour d'un axe passant par son centre, une force de Coriolis apparaîtra à l'intérieur de la coquille ; cela signifie que le plan d'un pendule de Foucault sera entraîné (avec une petite vitesse angulaire pratiquement immesurable). ” (Einstein, *lettre à E. Mach du 25 juin 1913*).

Pour saisir le sens de ces remarques et le lien avec les idées de Mach, il est nécessaire de bien comprendre que les masses d'épreuve considérées restent *immobiles* par rapport à la coquille massive qui les renferme. C'est le mouvement de celle-ci qui crée des forces d'inertie, de la même façon que le mouvement de la sphère céleste pourrait, selon Mach, influencer le mouvement du liquide dans le seau immobile. L'effet, infime, ne peut évidemment pas être mesuré. Mais cette expérience de pensée montre qu'il n'existe plus, dans la pensée d'Einstein, de référentiels privilégiés (les référentiels galiléens de la mécanique classique).

Pour le célèbre physicien, l'idée que les masses lointaines puissent créer de l'inertie ici est déterminant. Associé à une description du monde en terme d'hypersurface fermée, c'est une des bases de sa nouvelle théorie. Dans les équations qu'il écrit, la géométrie locale est déterminée par l'ensemble de la matière contenue dans l'univers, et le mécanisme de ce couplage est la gravitation.

6. Conclusion

A propos du pendule de Foucault, on présente souvent le principe de Mach sous la forme suivante (par exemple dans H. Reeves, *Patience dans l'azur*, p. 198) : on considère, pour plus de simplicité, un pendule situé au pôle Nord. Un observateur situé à proximité remarque que le plan d'oscillation du pendule tourne autour d'un axe vertical. Mais par rapport à quoi est-il fixe ? A l'échelle d'une journée, il semble suivre le mouvement du soleil, mais une observation de quelques jours montre que ce n'est pas le cas : le soleil finit par se déplacer par rapport au plan d'oscillation. On se repère alors par rapport aux étoiles lointaines, mais on constate au bout de quelques années que celles-ci se déplacent également par rapport au plan d'oscillation du pendule : les étoiles ne sont pas fixes, elles tournent lentement autour du centre galactique. Il faut alors pointer le centre de

la galaxie. Là encore, une observation patiente (l'effet est sensible au bout de milliers d'années !) montrerait que le centre de la Galaxie dévie par rapport au plan d'oscillation du pendule. Il en est de même pour des galaxies proches, pour des galaxies plus lointaines, pour l'amas local de galaxies... En fait, tout se passe comme si le plan d'oscillation du pendule était immobile par rapport à l'univers le plus lointain connu, les quasars par exemple. Cette influence des masses les plus lointaines sur le comportement du pendule est surprenante. On lui a donné le nom de " principe de Mach ".

Rappelons-nous cependant que cette interprétation ne se trouve pas dans les écrits de ce dernier. D'ailleurs, quelqu'un a-t-il vérifié que le plan du pendule de Foucault restait immobile par rapport aux quasars lointains ? Cela ne reste, en tout état de cause, qu'une hypothèse.

Anthelme Lee

Mai 2005
