

Interaction lumière matière (L'éclipse du 29 mai 1919)

Christian Larcher

Entre la conception d'Einstein et celle de Newton le langage est le même, la matière agit sur les rayons lumineux mais le cadre conceptuel est complètement différent.

Avant Einstein, la théorie de l'émission

Au XVIII^e siècle, après le succès des Principia (1687), Newton cherchera à étendre le cadre unitaire et le caractère universel des théories de la mécanique à la lumière. Pour lui, la lumière est composée de particules ponctuelles, sortes de globules lumineux analogues à des corpuscules matériels. La lumière est assimilée à **une émission de particules** qui suivent les mêmes lois balistiques que celles qui concernent la trajectoire d'un boulet de canon. Ces corpuscules soumis à des forces peuvent être déviés, accélérés ou freinés. Le principe de la relativité galiléenne d'addition des vitesses s'applique également.

À l'époque on sait, depuis les travaux de Römer, que la vitesse de la lumière est très grande mais finie. Dans ce cadre conceptuel, la vitesse de la lumière peut varier et dépend à la fois de la vitesse de la source lumineuse et de celle de l'observateur.

La théorie corpusculaire de la lumière implique curieusement, que pour un parcours de même longueur, ces corpuscules traverseraient plus rapidement un milieu transparent dense comme l'eau qu'un milieu comme l'air ou le vide.¹

En définitive il existe pour Newton deux types de forces, la force de gravitation et la "force réfringente" responsable des phénomènes d'émission, de réfraction et de réflexion de la lumière. Il écrit dans en 1704 dans Optique : "*Est-ce que les corps n'agissent pas à distance sur la lumière et, par leur action, ne courbent-ils pas ses rayons ? Et*

¹ Cette théorie va perdurer jusqu'à l'expérience cruciale imaginée par Arago et réalisée par Foucault en 1850 dans la grande salle Cassini de l'Observatoire de Paris. Cette expérience montre que la vitesse de la lumière dans l'eau est en réalité plus faible que la vitesse de la lumière dans l'air. Elle est dite cruciale car elle marque le triomphe de la conception ondulatoire de la lumière aux dépens de la conception corpusculaire mais ce triomphe ne dura qu'environ 50 ans.

cette action n'est-elle pas d'autant plus intense que sa distance est moindre".

Un siècle après la parution des Principia, la théorie de la lumière sera nommée "théorie de l'émission". En 1801 un astronome prussien, Johan von Soldner (1776 – 1833), s'appuyant sur le cadre de l'optique newtonienne calcule qu'un rayon lumineux rasant le Soleil devrait subir une déviation de 0,84 seconde d'arc. Albert Einstein arrivera au même résultat en 1911 mais en utilisant un cadre conceptuel très différent (celui de la Relativité Restreinte). Plus tard en 1921 Lenard, un scientifique allemand profondément antisémite, accusa Einstein d'avoir plagié von Soldner.

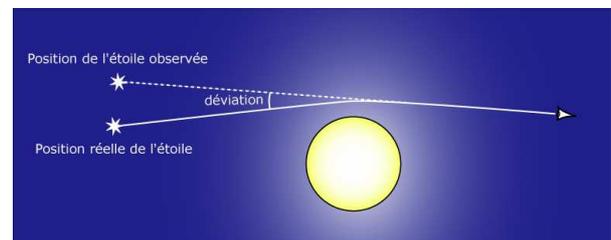


Fig.1. Déviation d'un rayon lumineux passant à proximité du Soleil

Gravitation et lumière dans le cadre de la Relativité Générale

La théorie de Newton postule l'existence d'un espace absolu et d'un temps absolu. Avec la Relativité Générale le temps et l'espace ne sont plus postulés a priori. C'est la distribution de la matière contenue dans l'Univers qui détermine la structure de l'espace-temps. La gravitation devient une propriété de l'espace lui-même. Pour Albert Einstein, l'espace, en tant que concept détaché de tout contenu physique, n'existe pas. Là où il n'y a pas de corps, il n'y pas de champ de gravitation, donc pas d'espace. Il sera toujours question de déviation de la lumière par les corps massifs mais cette déviation ne résulte plus de l'action d'une force.

Par ailleurs Albert Einstein arrive à la conclusion que, quel que soit le mouvement de la source ou de

l'observateur, la vitesse de la lumière reste constante. Par conséquent le principe d'addition des vitesses de la relativité galiléenne ne s'applique pas à la lumière.

Il est courant de représenter, de façon imagée, l'espace-temps par une surface plane dans notre univers en 3D. Dans cet espace-temps, la Terre suit la courbure de l'espace selon des trajectoires privilégiées que l'on appelle géodésiques. Les géodésiques d'un espace courbe constituent une généralisation de ce qui constitue une ligne droite dans un plan.

Henri Poincaré dans son livre "*La Science et l'Hypothèse*" écrit qu'une ligne droite est "*simplement la trajectoire d'un rayon lumineux*".²

Dans le cadre complexe de la Relativité Générale il est nécessaire de bien distinguer : la réalité physique, le concept physique et le modèle mathématique qui en rend compte. Mais nous reviendrons sur cette question délicate dans un article futur.

Albert Einstein considérait que sa théorie avait une telle cohérence qu'il pouvait affirmer, au sujet de la validation expérimentale :

"On peut dire une chose avec certitude : si une telle déflexion n'existe pas, alors les hypothèses de ma théorie ne sont pas correctes" (lettre à Freundlich du 1^{er} septembre 1911).

Et dans une autre lettre adressée à son ami Besso en mars 1914 :

"Maintenant, je suis entièrement satisfait, et je ne doute plus de la validité de tout le système, que l'observation de l'éclipse solaire réussisse ou non. La logique de la chose est par trop évidente".

L'éclipse et les conditions de validation expérimentale de la théorie d'Einstein

En novembre 1917 une commission décide de tester la théorie d'Einstein lors de l'éclipse totale du 29 mai 1919. Cette éclipse remplit des conditions particulièrement favorables. En particulier elle se produit devant un champ céleste riche en étoiles

² On peut donner des images pour aider à la compréhension mais avec les risques que cela comporte. L'espace-temps constitue un système à quatre dimensions (trois d'espace et une de temps). L'exemple qui suit concerne seulement notre monde familier qui n'en comporte que trois.

Pour aller en avion d'un point A à un point B à la surface du globe le pilote peut suivre un cap constant, il va couper tous les méridiens rencontrés sous le même angle. Mais il ne s'agit pas du chemin le plus court. Celui-ci est constitué par une portion de grand cercle dont le rayon est celui de la Terre.

Albert Einstein dans une lettre destinée à son fils Eduard résume sobrement sa recherche :

"Vois-tu mon fils, quand une punaise se traîne à la surface d'une sphère, elle ne sait plus que son chemin est courbe. J'ai eu la chance de le remarquer".

brillantes et bien réparties (les Hyades dans la constellation du Taureau).



Fig.2. Position du Soleil éclipsé dans la constellation du Taureau le 29 mai 1919.

Deux sites situés sur la bande de totalité sont choisis. L'un se trouve au nord-est du Brésil à Sobral près de Fortaleza l'autre sur l'île Principe en Afrique occidentale dans le golfe de Guinée. Eddington sera le responsable des deux expéditions.

Le financement prévu est de 1 100 Livres : 1 000 pour l'expédition et 100 pour le matériel (1 livre de 1919 = 6 000 livres de 2010 soit environ 7 200€).

L'objectif de la mission

Il s'agit de déterminer au moment de l'éclipse si les rayons lumineux issus des étoiles et passant très près du Soleil sont légèrement déviés par rapport à leurs positions habituelles et, si c'est le cas, de mesurer la valeur cette déviation. Pour effectuer cette mesure on prendra une série de photos donnant la position des étoiles visibles dans le fond du ciel et qui se trouvent près du Soleil éclipsé. Avant ou après l'éclipse, on prendra d'autres photos de nuit du même champ stellaire. La superposition des plaques photos devrait permettre de mesurer une éventuelle déviation.

Pour Eddington, trois cas sont possibles :

- La déviation est nulle ou l'interaction non mesurable.
- La déviation existe, elle est de l'ordre 0,84'' en accord avec la théorie de Newton.
- La déviation est de l'ordre de 1,75'' comme prévu par la théorie d'Einstein.

Cette valeur de 1,75'' est une valeur extrapolée à partir d'écartes progressivement décroissants. En fait il s'agit de vérifier si l'on a $1,75''/\Delta$ avec Δ exprimé en rayon du Soleil. La valeur limite est donnée pour $R = 1$.

Déroulement de l'expédition

Une équipe constituée d'Eddington et Cottingham ira sur l'île Principe avec la lunette d'Oxford. L'autre équipe constituée de Davidson et Crommelin se rendra à Sobral avec la lunette astrographique de Greenwich, une lunette de 4 inch et un cœlostat.

Les deux équipes embarquent à Liverpool le 8 mars 1919. Elles se séparent à partir de l'île de Madère.

L'équipe d'Eddington arrive à Principe un mois avant la date de l'éclipse.

Sur l'île Principe Eddington écrit :

"Le jour de l'éclipse, le temps était défavorable. Quand la phase totale commença, le disque sombre de la Lune, entouré de la couronne, fut visible à travers un nuage ; c'était assez semblable à ces nuits sans étoiles où souvent la Lune n'apparaît que voilée".

Durant l'éclipse l'ambiance est lugubre entre le silence de la nature et le battement du métronome qui compte les 302 secondes de durée l'éclipse totale. Eddington envoie à Londres un télégramme de trois mots "Through Cloud Hopeful".

À Sobral au Brésil, Crommelin écrit :

"Le jour de l'éclipse commença fort mal, la proportion de nuages tôt le matin étant d'environ 9/10 » il ajoute « *un grand trou clair se fit dans les nuages et atteignit les alentours du Soleil juste à temps*". Crommelin envoie un télégramme à Londres : *"Eclipse splendid"*.

L'annonce des résultats et ses conséquences

Après le retour à Londres une étude approfondie des résultats est entreprise. Il faut déterminer les plaques qui sont utilisables (2 seulement pour Principe) corriger les résultats en prenant en compte de nombreux paramètres (erreurs systématiques, turbulence de l'air, taches de diffraction, phénomènes d'aberration et de réfraction etc.)

Finalement les valeurs retenues sont :

Pour Sobral $1,98'' \pm 0,12''$

Pour Principe $1,61'' \pm 0,30''^3$

Dans l'article final l'Astronome Royal Dyson écrit concernant les résultats de Sobral : *"Après une étude soigneuse des plaques, je suis prêt à déclarer qu'il n'y a aucun doute qu'elles confirment les prédictions d'Einstein. Un résultat tout à fait certain a été obtenu selon lequel la lumière est défléchié en accord avec la loi de gravitation d'Einstein"*.

Eddington quant à lui ajoute : *"Ce résultat va dans le sens des chiffres obtenus à Sobral"*.

Une réunion commune de la Royal Society et la Royal Astronomical Society sous la Présidence de JJ Thompson (Prix Nobel pour la découverte de l'électron) a lieu le 6 novembre 1919 pour faire le bilan des expéditions. Voici le compte rendu d'un témoin oculaire Sir Whitehead tel qu'il est transmis dans le livre de Philippe Frank "Einstein, sa vie son temps" ; Flammarion 1991 page 215.

³ La valeur théorique de l'angle de déviation finalement retenue par Einstein est donnée par la relation : $\alpha = 4GM/c^2r$
r = distance de plus courte du rayon lumineux au centre du Soleil. M est la masse du Soleil.

"J'eus la bonne fortune d'assister à la réunion de la Société Royale à Londres lorsque l'astronome royal d'Angleterre annonça que les plaques photographiques de la fameuse éclipse, mesurées par ses collègues à Greenwich, vérifiaient les prévisions d'Einstein selon lesquelles les rayons de lumière sont courbés lorsqu'ils passent dans le voisinage du Soleil.

L'atmosphère entière d'intense attention fut exactement celle du drame grec. Nous formions le chœur qui commente les décrets du destin, tels qu'ils sont révélés par le cours de l'évènement suprême. Il y avait une valeur de drame dans le très scénique, très traditionnel cérémonial, avec en arrière plan le portrait de Newton pour nous rappeler que la plus grande des généralisations de la science venait, après plus deux siècles, de recevoir sa première atteinte (...) Les lois de la physique sont les décrets du destin".

Ce résultat eut un profond retentissement dans la société et pour la gloire d'Einstein qui du jour au lendemain fut véritablement « déifié ».

Cette expérience de validation des théories d'Einstein a eu, on le sait maintenant, beaucoup de conséquences. Pour n'en citer qu'une, elle est à l'origine de la découverte des lentilles gravitationnelles qui permet d'obtenir une image agrandie et une luminosité amplifiée de sources lumineuses lointaines. Une des applications actuelles est la découverte de nouvelles exoplanètes.

Bibliographie

- *Avant Einstein ; Relativité, lumière, gravitation* ; Jean Eisenstaedt ; Seuil 2005.
- *Einstein et la relativité générale* ; les chemins de l'espace-temps ; Jean Eisenstaedt ; CNRS éditions 2002.
- *Einstein, sa vie, son temps* ; Ph. Frank ; Flammarion 1991.
- *Einstein aujourd'hui* ; collectif ; Aspect et al. ; EDP sciences et CNRS Éditions.
- *L'univers et la lumière* ; Nottale ; Flammarion 1994.
- *La physique du XX^e siècle* ; M. Paty ; EDP Sciences.
- *La Science et l'Hypothèse* ; H. Poincaré ; Flammarion 1989.
- *Les dossiers de la Recherche* ; l'héritage Einstein ; N°18 février-avril 2005.

Pour voir la carte de l'éclipse de 1919 cliquer sur :

http://xjubier.free.fr/site_pages/solar_eclipses/xSE_GoogleMapFull.php?Ecl=+19190529&Acc=2&Umb=1&Lmt=1&Mag=0

- Article de la revue "Ciel & Espace" mai 2008 p. 54 intitulé "Les preuves étaient fausses" ; Jean Marc Bonnet-Bidaud. ■