

AVANT LA RELATIVITE RESTREINTE EINSTEINIENNE

1. INTRODUCTION

Einstein n'est pas celui qui a inventé la relativité, et il faut remonter jusqu'à Galilée pour en trouver la première formulation. Le principe fondamental de la relativité galiléenne, énoncé dans la première moitié du XVII^e siècle, constitue un point de départ essentiel de la physique moderne. Dans les termes imagés qu'utilisait Galilée, ce principe nous dit que des papillons embarqués à bord d'un navire volettent à l'intérieur toujours de la même façon, que le navire soit immobile ou qu'il vogue à sa vitesse de croisière sur la Méditerranée. D'une manière plus rigoureuse, il énonce que les lois de la nature sont les mêmes dans un référentiel (cadre – il s'agit souvent d'un objet particulier - par rapport auquel on étudie les phénomènes) et dans un autre en mouvement de translation uniforme par rapport au premier ; on parle d'équivalence des référentiels, appelés pour cela « référentiels galiléens ». La compréhension et la maîtrise de cette notion de référentiel, relativement auquel toute étude doit être conduite, sont indispensables avant d'aborder avec quelque espoir de succès l'étude de la relativité restreinte. Avant d'aborder cet aspect nous développerons une approche historique qui montrera mieux les difficultés pour clarifier les différents concepts intervenant dans notre sujet.

2. MECANIQUE CLASSIQUE : TEMPS ET ESPACE ABSOLUS

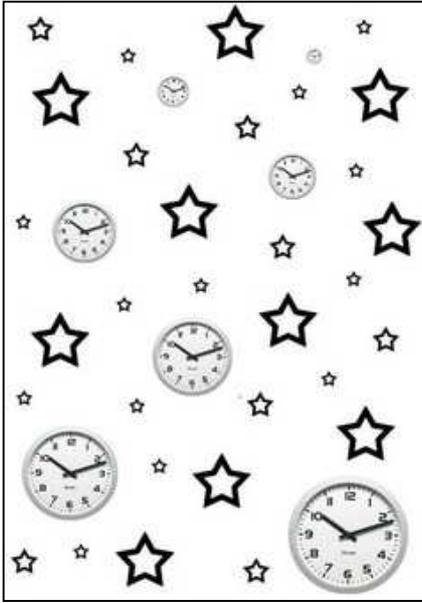
A la fin du XVII^e siècle, **Isaac Newton** (1642 / 1727), à la suite des travaux de Galilée et de Descartes, pose les bases de la dynamique dans son célèbre ouvrage « *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ». En mécanique newtonienne l'étude du mouvement d'un point matériel¹ nécessite préalablement de définir la nature de l'espace et du temps intervenant dans la mise en équation des problèmes posés. En effet le principe d'inertie² exprime l'idée qu'un corps abandonné à lui même reste au repos ou conserve son mouvement rectiligne uniforme. On est alors amené à se poser les questions suivantes : le principe d'inertie est-il valable dans tous les référentiels et, si çà n'est pas le cas, dans quel(s) référentiel(s) l'est il ?

La mécanique classique admet la transmission instantanée des interactions ; cette hypothèse est essentiellement celle des successeurs de Newton car ce dernier n'était pas sûr de cette affirmation et n'a jamais tranché clairement en faveur d'une réponse définitive. Cette idée était en accord avec les observations qu'il était possible de faire durant la période allant de la fin du XVII^e au milieu du XIX^e siècle. Les techniques de cette époque étaient incapables, par exemple, de mesurer la durée de transmission d'une impulsion entre les extrémités d'une barre rigide et on ne pouvait rien savoir des vitesses de propagation des interactions gravitationnelles ou, plus tard, électromagnétiques³ qui, pour les savants concernés, n'avaient pas de rapport avec celle de la lumière que l'on avait pu déjà déterminer par des moyens astronomiques (Roëmer, Bradley).

¹ Chez Newton la notion de point matériel permet de remplacer un objet de « petite taille » - c'est à dire dont les dimensions sont très inférieures aux distances intervenant dans le problème étudié – par un point mathématique ayant, dans un repère préalablement choisi, des coordonnées $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$, t étant le temps.

² C'est Descartes qui le proposera en premier en 1644.

³ Les premières mesures de la vitesse de propagation de l'électricité datent de 1831 et ont été réalisées par Charles Wheatstone (1802 / 1875) en utilisant des circuits électriques de plusieurs centaines de mètres de longueur.



Avec cette idée d'instantanéité de perception de n'importe quel événement se produisant en tout point de l'Univers, le concept de **temps** prend un sens **absolu** : ayant choisi une origine des temps identique, tous les observateurs, occupant n'importe quelle position, pourront affirmer simultanément que leur horloge marque le même instant (t). On peut qualifier le temps d'absolu puisqu'il est indépendant du système de référence spatial dans lequel on le mesure. Le temps absolu est le temps indiqué par toutes les horloges présentes sur une photographie prise à un instant donné et pour laquelle la lumière émise par chaque horloge se propage à une vitesse infinie. Ainsi l'acceptation de cette dernière propriété permet en mécanique classique de parler, pour un événement,

d'une position spatiale relative – c'est à dire qui dépend du référentiel d'étude choisi – et d'une position temporelle absolue. On a un temps commun unifié qui s'écoule de la même façon pour tous les observateurs. Le problème de la synchronisation des horloges ne se pose donc pas à partir du moment où le signal permettant de l'obtenir parvient en n'importe quel point de l'univers à l'instant où il a été émis. La phrase « *L'événement A au point (x_A, y_A, z_A) s'est produit au même instant que l'événement B (x_B, y_B, z_B)* » a un sens physique.

Mais, avec le temps, les choses se sont compliquées : depuis la fin du XVII^e siècle, on savait que la lumière se propageait à vitesse finie. Pour les autres interactions, comme la gravitation, on pensait qu'elle le faisait « beaucoup plus vite ». On pouvait alors se demander s'il était possible de conserver le concept de temps « absolu » et de simultanéité « absolue » d'événements éloignés. Etait-il encore possible de synchroniser des horloges dans ces nouvelles conditions ? Suffisait-il de tenir simplement compte dans les calculs du temps de propagation de la lumière ?

Au XIX^e siècle, le développement de l'électrodynamique et de l'optique a pu laisser espérer qu'il était possible de répondre positivement à ces questions en s'appuyant sur un autre concept introduit par Newton. Nous avons distingué précédemment le repère spatial de mesure permettant de définir les coordonnées relatives (x, y, z) d'un événement et le repère temporel permettant de dater le même événement d'une manière absolue du fait de la propagation à vitesse infinie des interactions. Cependant, à partir d'expériences différentes de celles envisagées à propos du temps, Newton introduit la notion **d'espace absolu**. S'appuyant sur des considérations dynamiques, le grand savant anglais écrit dans les « Principia » :

« 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.[...] L'espace absolu et l'espace relatif sont les

mêmes d'espèce et de grandeur, mais ils ne le sont pas toujours de nombre, car, par exemple, lorsque la terre change de place dans l'espace, l'espace qui contient notre air demeure le même par rapport à la terre, quoique l'air occupe nécessairement les différentes parties de l'espace dans lesquelles il passe et qu'il en change réellement sans cesse. »

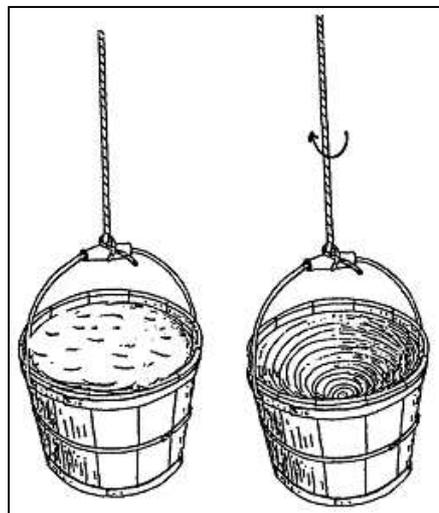
Les arguments du savant en faveur de son existence s'appuient sur le fait que les forces d'inertie – comme la force centrifuge, par exemple - n'apparaissent que dans les référentiels non galiléens, c'est à dire dans les systèmes accélérés. Nous savons tous que l'accélération d'un véhicule est perceptible d'une manière « absolue » et donc en dehors de toute référence extérieure. Les forces d'inertie qui apparaissent alors ne sont pas des interactions entre corps et les lois fondamentales de la dynamique doivent les intégrer dans leur expression.

Pour expliquer l'existence de ces forces particulières qu'il appelle **vis insista**, Newton distingue l'espace absolu et l'espace relatif. Le premier se présente comme un espace vide, préexistant aux corps qui l'occupent. Cependant, ce n'est pas l'espace géométrique des mathématiciens ; il jouit d'une propriété dynamique particulière : c'est dans l'espace absolu, et uniquement dans celui-ci, qu'opèrent les forces d'interaction. De ce fait il est possible de donner une signification physique précise du mouvement par rapport à l'espace absolu de Newton : il établit alors une relation entre l'espace absolu et les forces qui s'y développent en établissant une distinction entre mouvement absolu et mouvement relatif.

Le mouvement absolu, indique Newton dans cette introduction, est le déplacement d'un lieu absolu dans un autre lieu absolu. Un mouvement relatif sera toujours la différence de deux mouvements absolus. De ce fait les mouvements relatifs peuvent changer sans l'action d'une force. Il existe donc toute une classe de **référentiels en translation uniforme**⁴ par rapport à l'espace absolu pour lesquels agissent seulement ce que Newton appelle les **forces imprimés**⁵. Pour mieux asseoir sa distinction, Newton propose une expérience de pensée qu'on connaît aujourd'hui sous le nom de « Seau de Newton ». Il écrit :

« Les effets par lesquels on peut distinguer le mouvement absolu du mouvement relatif sont les forces qu'ont les corps qui tournent pour s'éloigner de l'axe de leur mouvement, car dans le mouvement circulaire purement relatif ces forces sont nulles et dans le mouvement circulaire vrai et absolu elles sont plus ou moins grandes selon la quantité du mouvement.

Si on fait tourner en rond un vase attaché à une corde jusqu'à ce que la corde, à force d'être torse, devienne en quelque sorte inflexible, si on met ensuite de l'eau dans ce vase et qu'après avoir



⁴ Einstein les a appelés repères galiléens.

⁵ D'après la 4^e définition il s'agit, pour Newton, des forces effectivement appliquées au corps d'épreuve

laissé prendre à l'eau et au vase l'état de repos, on donne à la corde la liberté de se détortiller, le vase acquerra par ce moyen un mouvement qui se conservera très longtemps : au commencement de ce mouvement la superficie de l'eau contenue dans le vase restera plane, ainsi qu'elle l'était avant que la corde se détortille ; mais ensuite le mouvement du vase se communiquant peu à peu à l'eau qu'il contient, cette eau commencera à tourner, à s'élever vers les bords et à devenir concave, comme je l'ai éprouvé et son mouvement s'augmentant, les bords de cette eau s'élèveront de plus en plus, jusqu'à ce que les révolutions s'achevant dans des temps égaux à ceux dans lesquels le vase fait un tour entier, l'eau sera dans un repos relatif par rapport à ce vase. L'ascension de l'eau vers les bords du vase marque l'effort qu'elle fait pour s'éloigner du centre de son mouvement et on peut connaître et mesurer par cet effort le mouvement circulaire vrai et absolu de cette eau, lequel est entièrement contraire à son mouvement relatif, car dans le commencement où le mouvement relatif de l'eau dans le vase était le plus grand, ce mouvement n'excitait en elle aucun effort pour s'éloigner de l'axe de son mouvement : l'eau ne s'élevait point vers les bords du vase, mais elle demeurait plane et par conséquent elle n'avait pas encore de mouvement circulaire vrai et absolu : lorsque ensuite le mouvement relatif de l'eau vint à diminuer, l'ascension de l'eau vers les bords du vase marquait l'effort qu'elle faisait pour s'éloigner de l'axe de son mouvement et cet effort qui allait toujours en augmentant indiquait l'augmentation de son mouvement circulaire vrai. Enfin, ce mouvement vrai fut le plus grand lorsque l'eau fut dans un repos relatif dans le vase. L'effort que faisait l'eau pour s'éloigner de l'axe de son mouvement ne dépendait donc point de sa translation du voisinage des corps ambiants et par conséquent le mouvement circulaire vrai ne peut se déterminer par de telles translations.

Le mouvement vrai circulaire de tout corps qui tourne est unique et il répond à un seul effort qui est la mesure naturelle et exacte ; mais les mouvements relatifs sont variés à l'infini, selon toutes les relations aux corps extérieurs et tous ces mouvements, qui ne sont que des relations, n'ont aucun effet réel, qu'en tant qu'ils participent du mouvement vrai et unique. De là il suit que dans le système de ceux qui prétendent que nos cieux tournent au-dessous des cieux des étoiles fixes et qu'ils emportent les planètes par leurs mouvements, toutes les parties des cieux et les planètes qui sont en repos par rapport aux cieux qui les environnent se meuvent réellement car elles changent leur position entre elles (au contraire de ce qui arrive aux corps qui sont dans un repos absolu) et étant transportées avec les cieux qui les entourent, elles sont effort, ainsi que les parties des tous qui tournent, pour s'éloigner de l'axe du mouvement. »

Incidentement, on peut constater que les textes de Newton n'ont pas la clarté de ceux de Galilée et la lecture précédente nécessite une attention soutenue pour être fructueuse.

Ce qui est important de comprendre c'est que, pour Newton, deux positions relatives identiques – l'eau et le seau sont au repos l'un par rapport à l'autre – peuvent correspondre à deux situations différentes. La réponse de Newton est que cette différence est due au fait que dans l'un des cas l'eau est au repos par rapport à l'espace absolu (figure de droite) alors que dans le second il est en

mouvement de rotation dans ce dernier. L'espace absolu va alors avoir un effet dynamique sur l'eau avec l'apparition d'une force d'inertie, la force centrifuge. La vision newtonienne est donc que l'espace absolu, contrairement à l'espace relatif qui n'est qu'un réceptacle passif, a, en plus de ces propriétés géométriques qui sont celles de l'espace euclidien, des propriétés physiques. Cette action de l'espace absolu sur un corps en mouvement rectiligne uniforme se manifeste par cette **vis insista** (« force d'inertie » qui est notre masse inerte ou inertie) « *par laquelle tout corps persévère de lui même dans son état actuel de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite.* »⁶

Cette approche a très tôt été critiquée. Dès 1710 Georges Berkeley (1685 / 1753) dénonce dans son ouvrage « **Traité sur les principes de la connaissance** » toutes ces idées abstraites en lien avec la réalité matérielle objective qui sont autant de croyances fondées avant tout par le langage et ses illusions. Pour Berkeley, cela n'a de sens que dans la mesure où les concepts utilisés sont relatifs à des choses empiriquement perçues de manière sensorielle : le reste n'est que pur verbiage, pure abstraction. Leibniz (1646 / 1716) et Huygens (1629 / 1695) se sont également tous les deux opposés à cette idée « d'espace absolu ». Le premier écrit, en février 1716, dans une lettre à Clarke :

« Pour moi, j'ai marqué plus d'une fois que je tenais l'espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps ; pour un ordre des coexistences, comme le temps est un ordre des successions. Car l'espace marque en termes de possibilité un ordre des choses qui existent en même temps, en tant qu'elles existent ensemble sans entrer dans leur manière d'exister particulières et lors qu'on voit plusieurs choses ensemble, on s'aperçoit de cet ordre des choses entre elles. »

On voit donc que les critiques de Leibniz s'appuient essentiellement sur l'absence d'un support concret lié à une observation et permettant d'asseoir les concepts introduits par Newton : on ne perçoit que des mouvements relatifs, d'un corps par rapport à un autre corps. Il est toutefois important de mettre l'accent sur un point fondamental de la dynamique newtonienne qui n'a pas toujours été bien compris. Certains commentateurs des **Principia** estimaient que l'adoption des concepts d'espace, de temps et de mouvement absolus s'opposaient à la validité du principe de relativité en maintenant une hiérarchie proche de celle qu'il existait déjà dans l'Antiquité. En réalité, pour Newton, la reconnaissance de l'espace absolu permet de lui attacher un référentiel dans lequel les forces d'inertie sont **rigoureusement** nulles et, donc, le principe d'inertie **rigoureusement** vrai. Comme l'écrit **Marie-Antoinette Tonnelat** dans son important ouvrage « Histoire du principe de relativité »⁷, « *Ainsi dans l'espace absolu, tous les observateurs inertiels, c'est à dire en mouvement rectiligne et uniforme par rapport à cet espace et, par conséquent, les uns par rapport aux autres – sont strictement équivalents et l'on peut fonder un authentique Principe de Relativité Restreinte.[...] Ainsi conçus, l'espace, le*

⁶ L'espace absolu agit donc sur le corps en lui appliquant une force d'inertie mais il n'y a pas réciprocité : le corps n'agit en rien sur l'espace, ce qui est contraire à la loi dite « d'action et de réaction ».

⁷ Flammarion (1971)

temps, le mouvement absolu de la Physique newtonienne sont des notions asymptotiques. »

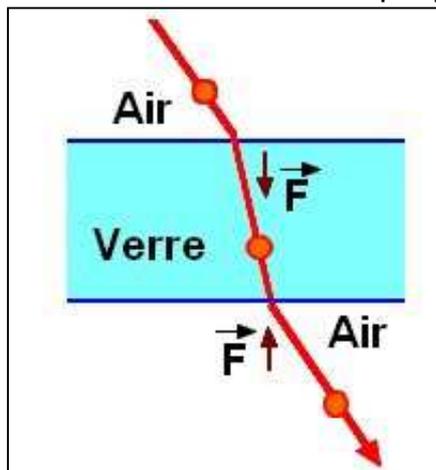
Cependant, la mise en œuvre scientifique puis technique de la théorie newtonienne du mouvement n'avait pas besoin de ce concept pour déployer sa pleine puissance et la querelle s'est rapidement épuisée dans le courant du XVIII^e siècle. Remarquons tout de même que ni Berkeley, ni Leibniz et ses autres détracteurs ne pouvaient donner de solution au problème que posait Newton : pour quelle raison les forces d'inertie apparaissent-elles dans les référentiels non galiléens ? Pour Newton c'est l'existence de l'espace absolu qui explique leur existence. Le désaccord n'était pas résolu mais simplement oublié.

3. LUMIERE : NATURE, VITESSE ET RAPPORT AU MOUVEMENT

3.1 Introduction

Sans entrer dans les détails⁸, il est important d'identifier les grandes étapes du difficile cheminement des physiciens, depuis Newton jusqu'à Einstein, qui les a amenés à renoncer à la transformation de Galilée pour la remplacer par celle de Lorentz.

Newton et ses successeurs vont appliquer avec succès les règles énoncées dans les « *Principia* » aux particules matérielles, mais pas à la lumière dont l'étude est alors essentiellement associée à l'optique ! Cependant cette dernière ne laisse pas indifférent Newton qui publie en 1704 son « *Optics* », ouvrage dans lequel il développe un modèle corpusculaire de la lumière. On peut voir sur la figure ci contre son explication de la réfraction : les particules formant le faisceau lumineux incident et se déplaçant à une vitesse finie sont soumises à une force perpendiculaire à l'interface d'origine gravitationnelle et



orientée en direction du milieu le plus dense. Sous l'action de cette force les particules vont se rapprocher de la normale au passage air/verre et s'en éloigner à la sortie verre/air. Ce modèle exige alors une vitesse plus grande dans le verre que dans l'air.

Dans le même temps Huygens propose sa conception ondulatoire – on y reviendra un peu plus loin – mais le succès de la vision « mécanique » du monde de Newton l'emporte et son modèle de « l'émission » dominera tout le XVIII^e siècle.

3.2 Première détermination de la vitesse de la lumière : Røemer

A la même époque les idées sur la propagation de la lumière vont évoluer grâce aux astronomes. C'est tout d'abord **Olaüs Røemer** (1644 / 1710) qui parvient, en 1676, à expliquer les retards périodiques observés dans la chronologie des mouvements des satellites de Jupiter en supposant que la lumière possède une vitesse finie.

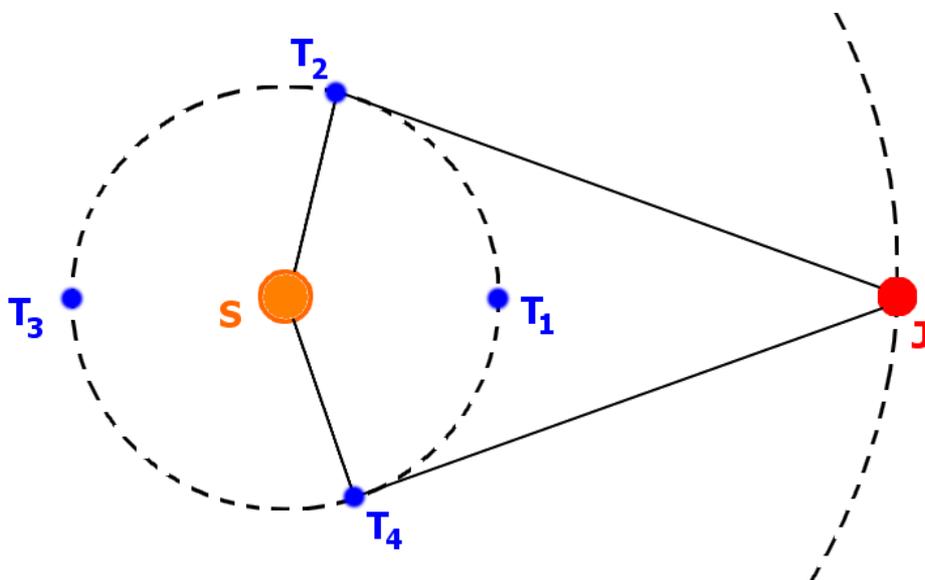
⁸ On pourra lire avec profit sur ce sujet l'ouvrage de Jean Eisenstaedt « Avant Einstein : Relativité, lumière, gravitation » - 2005 – Editions du Seuil

Disposant de moyens plus précis pour mesurer le temps⁹ **Jean-Dominique Cassini** (1625/1712) entrepris en 1664 l'étude des éclipses des satellites galiléens de Jupiter pour en établir des tables plus précises¹⁰.

En 1672 il y avait à l'observatoire de Paris un jeune astronome danois que **Jean Picard** (1620 / 1682) avait ramené de Copenhague : Olaüs Rømer. Ce dernier poursuivit les observations de Cassini concernant les satellites de Jupiter. Il confirma les constatations du grand astronome italien qui avait remarqué que, entre les instants prévus et les instants calculés de certains événements « faciles » à observer (par exemple disparition d'un satellite dans l'ombre de Jupiter), il existait une différence d'autant plus importante que la distance entre la Terre et Jupiter était plus grande. Cassini, le premier, avait supposé que ce phénomène pouvait être dû à la vitesse finie de la lumière puis s'était ravisé dans son explication. C'est son assistant Rømer qui, poursuivant dans cette voie, présentera, dans « **le Journal des Sçavans** » du 7 décembre 1676, la conclusion de son étude à la communauté scientifique.

On peut déduire de ses travaux¹¹ une vitesse de 220 000 km/s mais cette idée mettra plusieurs décennies à s'imposer, en particulier en France où les cartésiens n'acceptaient pas un tel résultat.

Voyons plus en détail la méthode de Rømer. Auparavant rappelons quelques propriétés importantes de la cinématique du système étudié. Jupiter étant une planète extérieure, sa visibilité depuis la Terre obéit à quelques conditions liées aux positions relatives Terre (T), Soleil (S), Jupiter (J).



Les trois positions remarquables indiquées sur le schéma sont :

- T_1 : opposition c'est à dire alignement $S - T_1 - J$
- T_3 : conjonction c'est à dire alignement $T_3 - S - J$
- T_2 et T_4 : quadrature pour laquelle l'angle (TS, TJ) vaut 90° .

⁹ Huygens avait mis au point en 1657 l'horloge à balancier beaucoup plus précise que les précédentes.

¹⁰ Il souhaitait se servir de ces tables pour améliorer la détermination de la longitude en mer.

¹¹ Rømer lui même n'a jamais réalisé ce calcul.

L'intervalle de temps qui sépare deux positions relatives (S,T,J) identiques est appelé période synodique T_s . Sa valeur se calcule avec l'expression suivante, dans laquelle T_T est la période sidérale¹² de la Terre (365,25j) et T_J celle de Jupiter (4332,59 j):

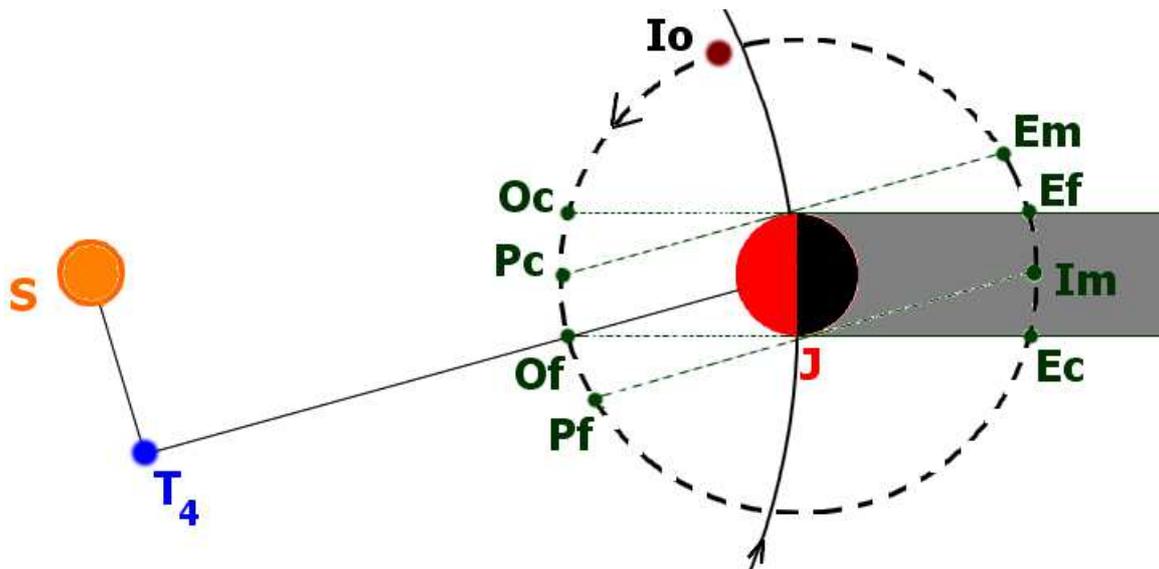
$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_T} - \frac{1}{T_J} \Rightarrow T_s = \frac{T_T \cdot T_J}{T_J - T_T} = 398,88 \text{ j}$$

Le moment le plus favorable pour observer Jupiter depuis la Terre est bien sûr celui d'une opposition car la planète géante est dans la direction opposée à celle du Soleil. Elle passe au méridien terrestre local à minuit et est visible pratiquement toute la nuit.

La valeur maximale de l'angle γ entre JS et JT s'observe lors d'une quadrature et peut être calculé facilement. On a en effet :

$$\tan(\gamma) = JT/JS = 150/778 = 0,19 \Rightarrow \gamma = 11^\circ$$

Jupiter possède 66 satellites répertoriés à ce jour (février 2013) dont la taille varie entre 1 et 5260 km. Les quatre plus gros sont connus depuis leur découverte par Galilée au début du XVII^e siècle. Ce sont, par ordre de proximité avec Jupiter, Io, Europe, Ganymède et Callisto. Ils tournent dans des plans très voisins de celui de l'équateur de Jupiter et dans le sens direct.



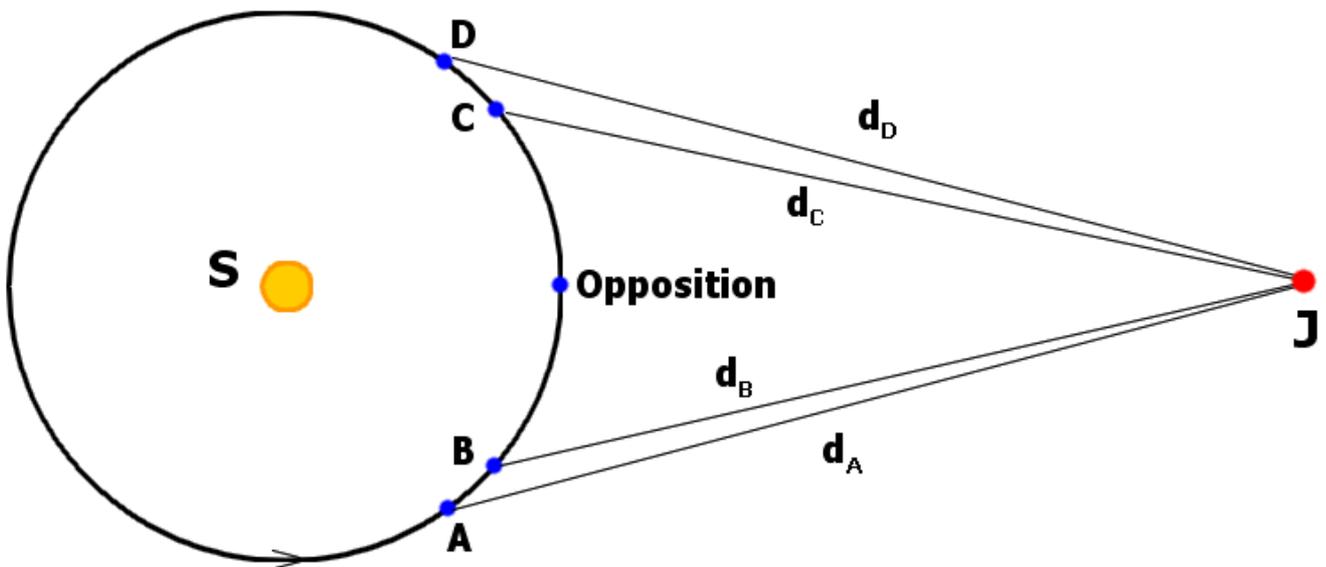
La figure ci dessus représente Io et Jupiter alors que la Terre et Jupiter sont en quadrature avant l'opposition. On distingue quatre types de phénomènes différents :

- les **éclipses** (Ec :éclipse commençante - Ef : éclipse finissante) : Io est à l'intérieur du cône d'ombre de Jupiter entre Ec et Ef.
- les **ombres** (Oc et Of) : Io projette son ombre sur Jupiter.
- les **passages** (Pc et Pf) : Io, vu depuis la Terre, passe devant le disque de Jupiter.
- les **occultations** (Im :immersion et Em : émersion) : Io, vu depuis la Terre, passe derrière Jupiter.

¹² La période sidérale d'une planète est l'intervalle de temps mis par cette dernière pour retrouver la même position sur son orbite par rapport aux étoiles.

Les phénomènes de passage et d'ombre sont toujours visibles depuis la Terre lorsque Jupiter l'est. Par contre, pour les éclipses et les occultations, on pourra observer soit le début, soit la fin selon que l'on est avant ou après une opposition. Sur le schéma ci dessus, on a représenté le système (Soleil, Terre, Jupiter) lors de la quadrature qui précède l'opposition et on constate bien que le début d'une éclipse de Io est visible depuis la Terre alors que sa fin ne l'est pas.

Au cours de ses observations, Rømer constata qu'avant l'opposition de Jupiter, les débuts d'éclipse du premier satellite se produisaient trop tôt alors que les fins d'éclipse se présentaient de plus en plus tard. Après l'opposition le phénomène se reproduisait mais dans l'autre sens : les mesures réalisées et les calculs effectués pour construire des tables de prédictions, ne correspondaient pas. Pour comprendre ces écarts, il va supposer que la lumière a une vitesse finie et qu'elle met donc un certain temps à franchir la distance Jupiter / Terre. Soit T la période de révolution de Io. On peut alors considérer deux situations différentes que l'on retrouve sur le schéma suivant :



AVANT L'OPPOSITION (position A et B) :

Un début d'éclipse se produit à l'instant t_0 , la suivante à l'instant $t_0 + T$. Si la lumière se propageait instantanément, les observations des fins d'éclipses successives de Io se produiraient avec le même écart T .

Dans le cas où la lumière a une vitesse finie c , le début de la première éclipse s'observera à l'instant $t_0 + d_A/c$ alors que celle de la seconde se produira pour l'observateur à l'instant $t_0 + T + d_B/c$ (avec $d_B < d_A$).

La période observée est donc plus courte et vaut :

$$T' = (t_0 + T + d_B/c) - (t_0 + d_A/c) = T - (d_A - d_B)/c$$

APRES L'OPPOSITION (position C et D)

Un raisonnement tout à fait analogue nous permettrait de déterminer la période observée après l'opposition avec $d_D > d_C$:

$$T' = T + (d_D - d_C)/c$$

On en conclut que l'on devrait mesurer des périodes différentes selon que les observations sont faites avant ou après l'opposition. Mais sur une période l'écart n'est pas mesurable. Rømer affirme alors que « *Ce qui n'est pas sensible sur deux révolutions devenait très considérable à l'égard de plusieurs prises ensemble et que, par exemple, 40 révolutions observées avant l'opposition étaient sensiblement plus courtes que 40 autres observées de l'autre côté ...* »

Il ressort clairement de l'analyse détaillée ici que Rømer avait conçu une méthode, valable sur le plan théorique, pour déterminer si la vitesse de la lumière était finie et pour en déterminer la valeur. La méthode qu'il a utilisée repose sur ce que nous appelons aujourd'hui l'effet Doppler¹³. Il s'est appuyé dessus 166 ans avant que Christian Doppler ne le mette en évidence. Cependant une étude quantitative des mesures obtenues indique que Rømer n'était pas en mesure de déterminer le temps avec une précision suffisante pour montrer de façon concluante la validité de son hypothèse et il n'a jamais calculé la vitesse de la lumière. Sa méthode et ses données ont toutefois été suffisantes pour convaincre un certain nombre de sommités scientifiques de son époque du fait que ses idées étaient valides.

3.3 L'aberration de la lumière : Bradley

Avec la théorie newtonienne de la gravitation et l'amélioration des moyens d'observation, les astronomes – anglais en particulier – du début du XVIII^e siècle vont alors se préoccuper de dresser des cartes du ciel de la meilleure qualité possible en mesurant la position des étoiles avec la plus grande précision. Ils veulent également profiter de ces progrès pour essayer de détecter d'hypothétiques variations annuelles de ces emplacements, ce qui apporterait une preuve « définitive » au modèle de Copernic. Rømer avait déjà tenté de réaliser – sans succès – au tout début du XVIII^e siècle, alors qu'il était directeur de l'observatoire de Copenhague, de telles mesures à l'aide d'une lunette méridienne dont il était l'inventeur.

Parmi ces astronomes nous porterons notre intérêt sur deux Anglais : **James Bradley** (1693 / 1762) qui, en compagnie de son ami **Samuel Molyneux** (1689 / 1729), va tenter de mesurer ces variations annuelles – appelées parallaxes – en utilisant une lunette spécialement conçue pour cette utilisation. Elle avait environ 4 m de long et avait été fabriquée pour observer avec précision des étoiles au voisinage du zénith.

Au cours de son mouvement annuel autour du Soleil, la Terre parcourt une orbite elliptique dont le demi-grand axe (a) fait environ 150 millions de kilomètres. De ce fait, une étoile peu éloignée de nous semblera, au cours de l'année, décrire sur le fond des étoiles très lointaines, une petite ellipse.

S. Molyneux, associé à J. Bradley, commence ses observations en 1725. Comme l'indique **Jean-Sylvain Bailly** (1736 / 1793) dans son « *Histoire de*

¹³ On trouvera en annexe une étude des observations de Rømer sous l'angle d'un effet Doppler.

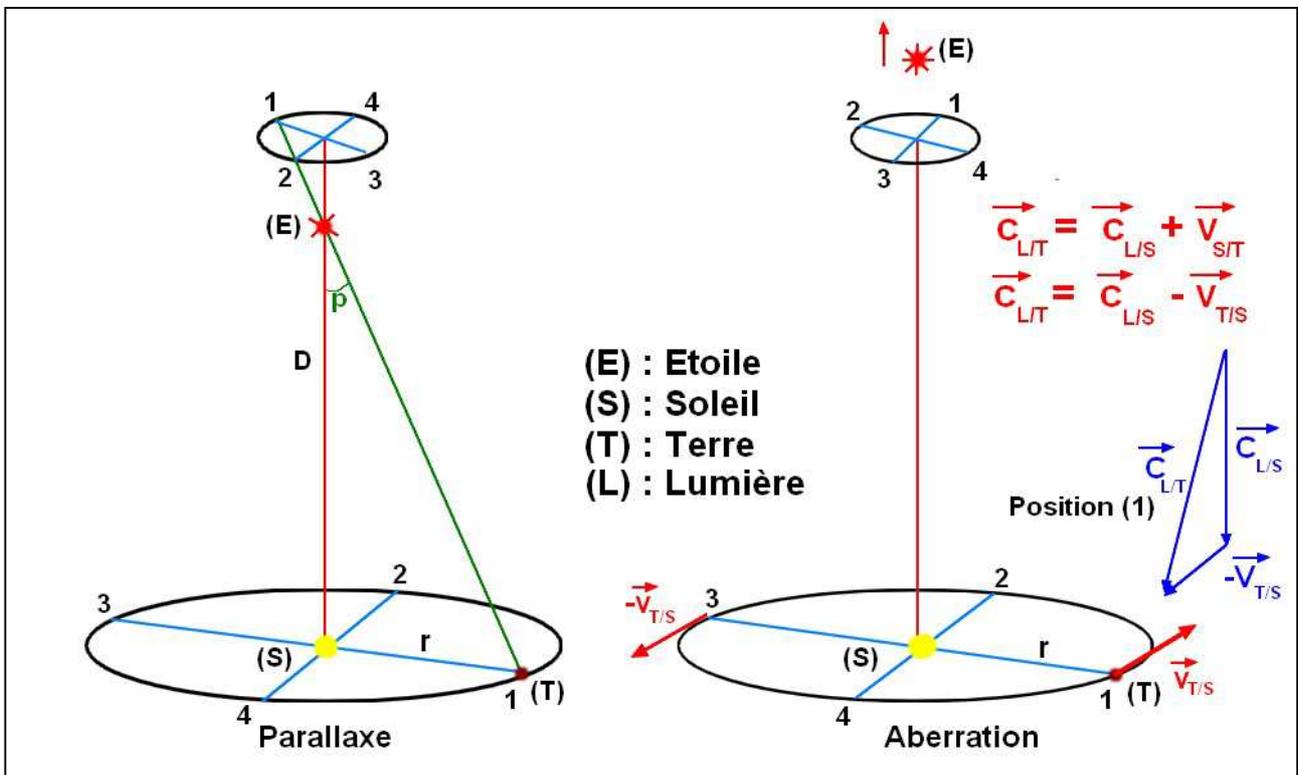
l'astronomie moderne depuis la fondation de l'école d'Alexandrie jusqu'à l'époque de MDCCXXX –tome 2 (1785) » :

« ...Il s'associe le jeune Bradley, professeur à Oxford, et destiné à se faire un grand nom dans l'astronomie par deux découvertes mémorables. Ils commencèrent ensemble leurs observations en 1725. Ces observations ne leur indiquèrent point d'apparences favorables à la parallaxe des fixes mais elles montrèrent des différences qui ne pouvaient être des erreurs, et qui méritaient d'être suivies. Molyneux, forcé d'abandonner ce travail¹⁴, le remit à Bradley et lui laissa une explication difficile et une occasion de gloire. Bradley étudia ses différences pendant trois années, il les trouva constantes ; toujours dans le même sens elles croissaient, décroissaient dans certaines saisons, et se renouvelaient avec l'année. [...] Bradley, possesseur d'un fait inconnu de la nature, voulu l'expliquer avant d'en annoncer la découverte. Les apparences étaient contraires aux apparences de la parallaxe ; il ne fallait donc point penser à cette cause. [...] La circonstance que ces variations sont annuelles dût l'éclairer et le mettre sur la voie de la vérité ; il était naturel de soupçonner qu'elles tenaient à la révolution de la terre autour du soleil. Le trait de génie fut de penser au mouvement progressif de la lumière. Bradley imagina que ce mouvement pouvait affecter annuellement le lieu des étoiles, comme il affectait chaque année les temps des éclipses des satellites de Jupiter.



Si la vitesse de la lumière était infinie, la lumière parcourrait instantanément la distance des étoiles à la terre. Nous ne connaissons point cette distance, on sait seulement qu'on peut la regarder comme infinie. Nous ignorons également le temps que la lumière emploie à parcourir cet intervalle ; mais la connaissance en est indifférente à l'astronomie : si l'on suppose la terre en repos, la distance aux étoiles restant toujours la même, qu'importe le temps que la lumière met à le traverser ? Ses particules se succèdent en forme de rayons continus et lorsque notre globe, en tournant sur lui-même, permet à un point de la surface d'apercevoir une étoile placée à l'horizon, ce point se trouve à l'extrémité d'un de ses rayons ; il est le terme d'une file de particules, et l'étoile est vue à l'autre extrémité : elle paraît se lever, et nous recevons ces particules de lumière, sans nous embarrasser du temps de leur voyage, et sans que les apparences en soient changées. Si on suppose, comme on doit le faire, la terre en mouvement autour du soleil, les phénomènes ne changent, les apparences ne varient qu'en raison de cette translation. [Bailly démontre ensuite que la parallaxe est imperceptible et que les rayons nous parvenant des étoiles sont tous parallèles, quelque soit notre position sur notre orbite]. Mais la terre [...] est un point mobile, elle marche tandis que la lumière se meut ; il y a donc deux mouvements, et si ces deux mouvements, si leurs vitesses peuvent être comparées, il doit en résulter un effet composé, suivant le principe incontestable de la composition des mouvements. »

¹⁴ Nommé Lord de l'Amirauté, S. Molyneux fut obligé de quitter Kew, à côté de Londres et lieu des observations.

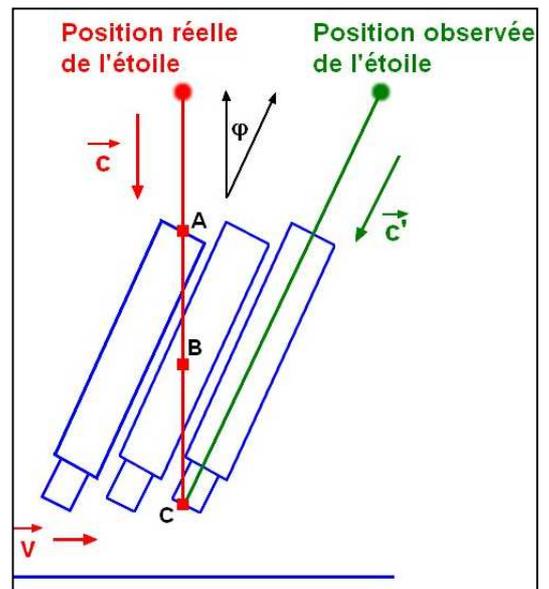


La figure ci dessus montre, à gauche, la situation recherchée (la parallaxe de l'étoile (E) est l'angle p) et, à droite, celle qui est observée. On constate, comme l'avait fait Molyneux et Bradley, que « ces observations n'indiquent point d'apparences favorables à la parallaxe » : le décalage annuel observé est tourné de 90° par rapport à celui correspondant à l'existence d'une parallaxe de l'étoile. Le phénomène de parallaxe est purement géométrique ; il ne dépend que de la distance de l'étoile et du rayon de l'orbite terrestre. On a simplement p (rd) = r/D et on observe une ellipse dont le demi-grand axe est d'autant plus petit que l'étoile est plus éloignée. Il faudra attendre 1838 pour que **F.W. Bessel** (1784 / 1846), disposant d'un instrument suffisamment performant, parvienne à mesurer une parallaxe : il s'agissait de celle de l'étoile 61 Cygni pour laquelle $2p \approx 0,62''$ d'arc.

Détaillons l'explication de Bradley en considérant, comme sur les deux figures ci dessus, que l'étoile observée est dans la direction du pôle de l'écliptique. L'étoile étant quasiment à l'infini les directions (SE) et (ST) peuvent être considérées comme étant parallèles.

Sur la figure ci contre on a représenté la lunette de visée dans plusieurs positions différentes entre l'instant où la « particule » de lumière touche son objectif et celui où elle parvient dans l'oculaire, donc dans l'œil de l'observateur.

Pour passer de la position (A) à la position (C) la lumière va mettre un temps t_1 tel que :



$$t_1 = \frac{AC}{c}$$

Pendant ce temps la lunette, solidaire de la Terre, avance dans l'espace de la distance d telle que :

$$\tan(\varphi) = \frac{d}{AC}$$

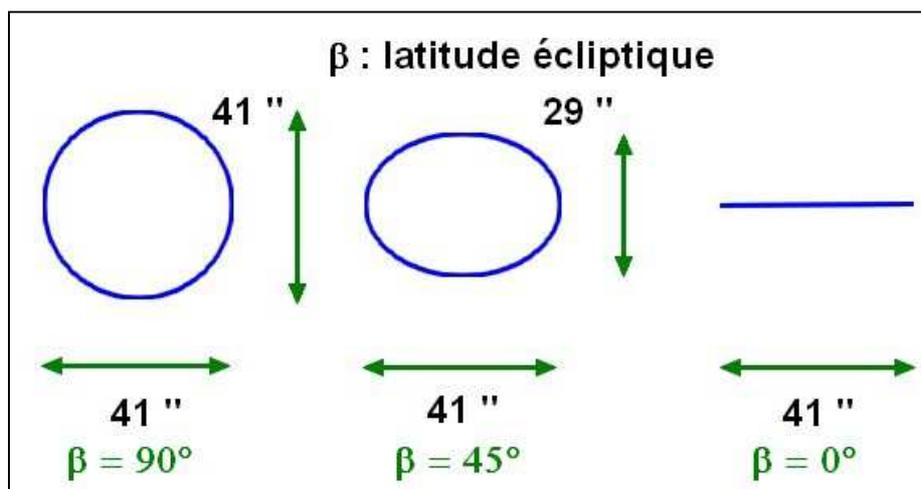
Or :

$$d = v.t_1 = \frac{v.AC}{c}$$

Finalement :

$$\tan(\varphi) = \frac{v}{c} \approx \frac{30}{300000} = 10^{-4} \Rightarrow \varphi \approx 20,5''$$

Cet effet, uniquement lié à la valeur finie de la vitesse de la lumière, ne dépend donc pas de la distance de l'étoile et constitue un nouveau phénomène optique appelé par Bradley « **aberration de la lumière**¹⁵ » et que l'on peut résumer de la manière suivante : **au cours de l'année toutes les étoiles parcourent sur la sphère céleste une ellipse dont le demi - grand axe est de 20,5 " d'arc.**



Le petit axe dépend de la latitude écliptique¹⁶, comme on peut le voir sur le schéma ci dessus.

Se plaçant dans le cadre du modèle corpusculaire newtonien de la lumière, Bradley avait pu donner une explication simple de ce qu'il avait observé. Mais il va aller plus loin dans son analyse car un aspect de ce résultat le surprend. Il sait que la vitesse de la Terre sur son orbite varie très peu en module, son orbite étant proche d'un cercle et il vient de constater que le demi- grand axe de l'ellipse d'aberration ne dépend pas, aux erreurs de mesure près¹⁷, de l'étoile étudiée : il faut alors en conclure que la vitesse de la lumière issue d'un étoile est constante et, donc, ne dépend pas des caractéristiques de cette

¹⁵ L'observation de ce phénomène avait été faite par Jean Picard à partir de 1660 environ mais sans recevoir aucune explication. Il avait cependant compris qu'il n'avait rien à voir avec la parallaxe ou la réfraction atmosphérique.

¹⁶ Le système de coordonnées écliptiques est un repère héliocentrique utilisant le plan de l'écliptique comme plan équatorial. La latitude écliptique représente l'angle mesuré dans un plan perpendiculaire à l'écliptique entre la direction de l'objet visé et le plan de l'écliptique.

¹⁷ Ayant évalué ces erreurs, Bradley estimera que la variation de vitesse de toutes les étoiles étudiées ne peut pas dépasser 5 à 10%.

dernière. Pour Bradley les vitesses des étoiles par rapport au système solaire sont imperceptibles car leur effet est trop faible pour être mesuré. Mais il reste une question beaucoup plus difficile à résoudre. Dans le modèle mécanique de Newton « *les rayons lancés au dehors par les vibrations des corps lumineux, étant à peine sortis de sa sphère d'attraction, sont poussés en avant* » avec une vitesse qui doit dépendre de l'attraction gravitationnelle plus ou moins grande exercée par l'étoile. Pour contourner cette difficulté, il faudrait alors supposer que toutes les étoiles sont identiques, ce qui n'est guère réaliste. Alexis Clairaut (1713 / 1765), dans une communication à l'Académie Royale des Sciences, en 1739, notera simplement, à ce propos, la phrase suivante : « ... *Les observations de M. Bradley prouvent que la vitesse de la lumière des étoiles qu'il a observées, est la même ; on en doit donc conclure que la lumière de toutes les autres étoiles est également prompte, sans quoi il faudrait imaginer que par le plus grand hasard M. Bradley n'a rencontré dans son secteur que celles qui avaient précisément la même vitesse de lumière.* » On peut s'étonner que Clairaut, newtonien convaincu, ne se soit pas posé de question sur cette constance de la vitesse de la lumière, peu en accord avec la théorie acceptée.

3.4 Les oubliés du XVIII^e siècle

Pourtant, au XVIII^e siècle, quelques savants, aujourd'hui oubliés, comme **John Michell**¹⁸ (1724 / 1793) ou **Robert Blair** (1748 / 1828), avaient déjà compris que, dans le cadre de la théorie de Newton, on pouvait développer une véritable optique des corps en mouvement. On devait pouvoir détecter les variations de la vitesse de la lumière dues à différentes causes : force gravitationnelle des corps sources exercée sur les corpuscules de lumière, vitesse relative source / observateur. Malgré l'insuccès de leurs tentatives, les conséquences de ces dernières ne sont pas négligeables : de nombreux concepts, expériences et analyses, considérés aujourd'hui comme étant d'élaboration plus récente¹⁹, y sont déjà présents. Il s'agit donc d'une première tentative de créer une théorie classique de la lumière, satisfaisant aux exigences du principe de relativité, anticipant alors la cinématique einsteinienne et la théorie relativiste de la gravitation.

Ne disposant pas des moyens théoriques et expérimentaux qui leur auraient permis d'avancer dans leur entreprise, ils échouèrent à réaliser leur objectif mais, ayant pointé une question cruciale, ils transmirent à leurs successeurs une interrogation qui revint sur le devant de l'activité scientifique avec le changement de paradigme concernant la nature de la lumière. Au début du XIX^e siècle, suite aux travaux – conduits entre 1801 et 1803 - de **Thomas Young** (1773 / 1829), le modèle de l'émission céda progressivement la place au modèle ondulatoire. Ce dernier - imaginé par Huygens vers 1678 et publié en 1690 - , n'a jamais réussi à s'imposer avant 1815 pour différentes raisons mais la principale n'avait pas un caractère scientifique puisqu'elle concernait l'immense notoriété du promoteur de la théorie concurrente : Isaac Newton ! Cependant quelques scientifiques importants avaient continué à s'y intéresser :

¹⁸ Il est l'inventeur d'une balance de torsion, semblable à celle qu'inventera indépendamment un peu plus tard C.A. Coulomb et que ce dernier utilisera, en électrostatique, avec le succès que l'on connaît. On trouvera de nombreux détails sur leurs travaux dans le livre de J. Eisenstaedt cité.

¹⁹ L'effet Doppler / Fizeau (changement de fréquence lié à la vitesse) était anticipé et recherché par R. Blair dans son modèle corpusculaire (changement d'angle de réfraction lié à la vitesse)

Robert Blair, par exemple, avait conduit son étude théorique dans les deux modèles, bien qu'il fût nettement newtonien ; et surtout le suisse **Léonhard Euler** (1707 / 1783) qui pris nettement partie pour le modèle ondulatoire. On peut lire dans son ouvrage « *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie* » plusieurs affirmations allant clairement dans ce sens :

« [...] On est donc obligé de convenir de deux choses : l'une, que les espaces entre les corps célestes sont remplis d'une matière subtile ; et l'autre, que les rayons ne sont pas une émanation du soleil et des autres corps lumineux par laquelle une partie de leur substance en soit élancée, comme Newton a prétendu. Cette matière subtile qui remplit tous les espaces des cieux entre les corps célestes est nommée l'éther, dont l'extrême subtilité ne saurait être révoquée en doute. [...] L'éther est donc [...] un fluide comme l'air, mais incomparablement plus subtile et plus déliée, puisque nous savons que les corps célestes le traversent librement sans y rencontrer quelque résistance sensible. [...] Ainsi il paraît très certain que la lumière est à l'égard de l'éther la même chose que le son à l'égard de l'air, et que les rayons de lumière ne sont autre chose que des ébranlements ou vibrations transmises par l'éther, tout comme le son consiste en des ébranlements ou vibrations transmises par l'air. » (**Lettre XIX – 14 juin 1760**)

« [...] La lumière n'est autre chose qu'une agitation ou ébranlement causé dans les particules de l'éther, qui se trouve partout, à cause de l'extrême subtilité avec laquelle il pénètre tous les corps. [...] Si l'on demande pourquoi la lumière se meut avec une vitesse si prodigieuse, nous répondrons que la raison est l'extrême subtilité de l'éther, jointe à sa surprenante élasticité. » (**Lettre XX – 17 juin 1760**)

« [...] Cette propagation de la lumière se fait d'une manière semblable à celle dont le son provient d'un corps sonore. [Une cloche frappé est agitée d'un frémissement très sensible.] Cette agitation se communique d'abord aux particules de l'air plus éloignées ; de sorte que toutes les particules de l'air en reçoivent successivement un frémissement semblable, lequel entrant dans l'oreille y excite le sentiment d'un son. [...] Plus le nombre de vibrations [...] dans une seconde est grand, et plus le son est haut et aigu, pendant que des vibrations moins fréquentes produisent des sons bas et graves. [...] Toutes ces circonstances, qui accompagnent la sensation de l'ouïe se trouvent d'une manière analogue dans la sensation de la vue. [...] La sensation [dans l'œil] doit être différente, selon que ce trémoussement est plus ou moins fréquent, ou selon que le nombre de vibrations qui se font dans une seconde est plus ou moins grand. Il doit en résulter une différence semblable à celle qui se fait dans les sons, lorsque les vibrations rendues dans une seconde sont plus ou moins fréquentes. [...] C'est dans cette différence qu'il faut chercher la cause des diverses couleurs ; il est certain que chaque couleur répond à un certain nombre de vibrations dont les fibrilles de nos yeux sont frappées dans une seconde, quoique nous ne soyons pas encore en état de déterminer le nombre qui convient à chaque couleur, comme nous le sommes à l'égard des sons. » (**Lettre CXXXIV – 6 juin 1761**)

Personne ne reprendra, à ce moment là, les idées de Euler, bien que le modèle ondulatoire soit ici bien décrit, quarante ans avant qu'il ne réapparaisse dans l'œuvre Fresnel. On y retrouve les éléments essentiels – hormis la longueur d'onde - pour une description complète du phénomène :

- Un ébranlement source
- Une fréquence de vibration
- Une propagation
- Une vitesse
- Un milieu support pour cette propagation

Il y manque cependant un aspect quantitatif qui aurait permis de confronter des calculs avec les résultats expérimentaux. Euler fut également un des rares savants à s'interroger sur les difficultés rencontrées pour expliquer l'aberration de la lumière des étoiles dans les deux modèles. En effet si l'onde est bien adaptée pour justifier l'indépendance de la vitesse d'émission par rapport au mouvement et à l'attraction de la source, c'est le corpuscule qui donne le plus de facilité, avec la composition des vitesses, pour calculer l'amplitude du grand-axe de l'ellipse d'aberration ! Euler ne manqua pas de remarquer ce « paradoxe » mais n'avait pas les moyens de le résoudre. Il faudra attendre les développements de la théorie ondulatoire par Fresnel, comme nous le verrons un peu plus loin, pour y parvenir.

3.5 Début du XIX^e siècle : les premiers doutes

Sans beaucoup avancer sur le plan théorique, les scientifiques du XVIII^e siècle avaient malgré tout accumulé de très nombreuses observations sur la lumière et sa propagation, et plus particulièrement sur la manière dont elle traverse les cristaux. **William Wollaston** (1766 / 1828) avait refait les expériences que Newton et Huygens avaient réalisées un siècle auparavant sur la calcite : contrairement à ce que tout le monde pensait, Newton avait tort et Huygens raison. L'intérêt pour cette question était relancée et les savants français, qui constitue au début du XIX^e siècle la meilleure école au monde, se lancèrent alors dans de nouvelles recherches.

Mais, comme on l'a vu ci-dessus, le premier à ouvrir une brèche dans la théorie newtonienne est un Anglais. **Thomas Young** avait débuté ses travaux en physique par l'optique physiologique. Il avait proposé un modèle trichromique de la vision des couleurs. Ses lectures de Newton, de Huygens et de nombreux autres savants vont l'amener à s'intéresser à un modèle ondulatoire de la lumière²⁰. Ces observations des ondes mécaniques et de leurs propriétés lui suggèrent alors de refaire les expériences de Newton sur les anneaux du même nom qui fournissent ce que l'on appelle maintenant des franges d'égalles épaisseurs.

Comme Newton, il remplace la lame d'air par de l'eau et constate que les franges se resserrent. En analysant son observation en terme de retard entre deux ondes ayant suivi des chemins différents il en conclut - ce que Newton

²⁰ Jusqu'à Fresnel les ondes lumineuses dont on suppose l'existence sont, comme le son, longitudinales.

n'avait pas fait - que la lumière va moins vite dans l'eau que dans l'air. Young continue son étude et s'intéresse ensuite à la diffraction. Il refait les expériences de Grimaldi et a l'idée d'une manipulation qui est devenue aujourd'hui célèbre : celle des interférences des trous d'Young. Les observations qu'il fait sont en parfaite concordance avec ses prévisions ! Il n'y a plus de doute pour T. Young : la lumière est une onde qui se propage à la vitesse d'environ 300 000 km/s dans un milieu, l'éther. Un grand pas vient d'être fait mais les publications de Young, qui était médecin de formation, n'ont pas de succès. Bien pire, il est violemment attaqué par les savants newtoniens aussi bien anglais que continentaux qui font preuve avant tout d'incompréhension. Etayés par très peu de calcul, justifiés par des expériences peu nombreuses, les travaux de Young trouvent peu d'écho dans la communauté scientifique de ce début de XIX^e siècle. Un de ses correspondants français, **Etienne Malus** (1775 / 1812), lui écrit pour lui demander s'il peut expliquer les phénomènes de la polarisation ; Young reconnaît que ce n'est pas encore possible. Il faut se rappeler que, pour les adeptes de la théorie des ondes, ces dernières ont, comme le son, un caractère longitudinal.

Cette question de la polarisation est en effet au cœur des préoccupations de Malus. Ses premières interrogations vont venir d'une étrange observation : en regardant le reflet du Soleil dans une vitre à travers un morceau de calcite il constate les mêmes faits qu'en utilisant deux cristaux : pour une position particulière de la calcite le rayon extraordinaire est complètement éteint et pour une position à 90° de la précédente c'est au tour du rayon ordinaire de disparaître ! Malus multiplie les expériences et aboutit à une première conclusion : seules les orientations relatives du rayon incident, du plan d'incidence et de celui qui est perpendiculaire ont une importance dans la résolution de cette question. Il définit alors trois axes orthogonaux (a), (b) et (c). Newtonien convaincu, hostile à la théorie ondulatoire, Malus imagine alors que les particules de lumière ont une forme ellipsoïdale que l'on peut rapporter à ces trois axes. Les « molécules lumineuses » ont donc des pôles : le terme de polarisation est né. A la suite d'un raisonnement complexe il en conclut que les phénomènes observés s'expliquent par l'orientation forcée des particules lors de leur interaction avec la matière. Cette interaction se manifeste, pour Malus - inspiré en cela par **Pierre Simon de Laplace** (1749 / 1827) - par des forces répulsives agissant en surface, orientant les axes des particules et triant leur mouvement selon le rayon ordinaire ou extraordinaire en fonction du plan dans lequel se trouvent leurs axes (b) et (c), l'axe (a) étant constamment dans la direction de la propagation.

Mais d'où viennent ces forces qui s'ajoutent à la force réfringente de Newton ? De quelle nature sont-elles, quelle est leur intensité ? Pourquoi n'agissent-elles qu'en surface ? De plus, si T. Young ne parvient pas à expliquer la polarisation avec sa théorie ondulatoire, il faut également dire que E. Malus n'a pas plus de succès avec la sienne pour expliquer les interférences ! **Jean Baptiste Biot** (1774 / 1862), avec l'aide d'Arago, expérimente également sur des phénomènes de polarisation plus complexes dont les résultats, surprenant pour les deux modèles, compliquent encore les choses.

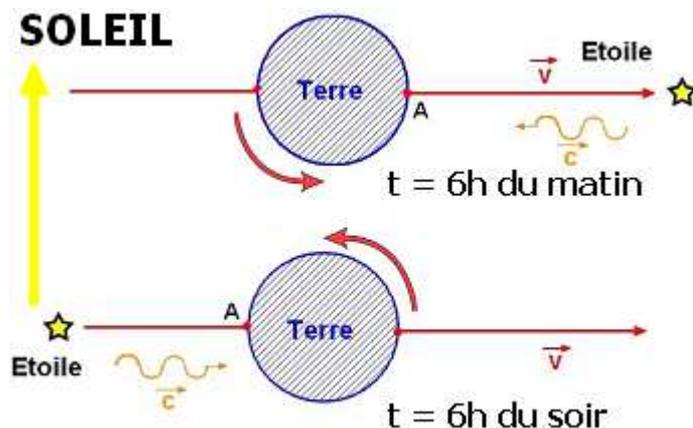
3.6 Tentative de mise en évidence du mouvement de la Terre

Les questions s'accumulent mais de nouvelles expériences de **François Arago** (1786 / 1853) vont encore aggraver les incohérences. Plusieurs d'entre elles – faites probablement sur une sollicitation de Laplace – étaient en rapport avec les propriétés de la lumière émise par des corps en mouvement. Réalisées en 1809, présentées le 10 décembre 1810 à la Première Classe de l'Institut²¹, elles firent l'objet d'un compte-rendu qui ne sera publié qu'en 1853²² (!) par Arago qui avait égaré le manuscrit.

Détaillons ici les questions que se posait Arago, la manière dont il a procédé et les conclusions qu'il a tirées de ses observations. Revenons tout d'abord sur l'interprétation du phénomène de réfraction dans le modèle corpusculaire. A l'approche du second milieu les corpuscules lumineux subissent une accélération quasi instantanée qui ne dépend que de la nature du milieu abordé et est indépendante de la vitesse initiale. L'angle dont le rayon incident est dévié ne doit donc dépendre que de cette vitesse antérieure. Il écrit : « [...] Si l'on se rappelle que la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux, en pénétrant obliquement dans les corps diaphanes, est une fonction déterminée de leur vitesse primitive, on verra que l'observation de la déviation totale, à laquelle ils sont assujettis en traversant le prisme, fournit une mesure naturelle de leur vitesse. [...]

En mesurant la déviation dans un prisme achromatique d'un rayon lumineux en provenance d'une étoile Arago va alors chercher à répondre à deux questions :

- La vitesse de la lumière en provenance d'une étoile varie t- elle selon que l'on approche ou que l'on s'en éloigne ?



- La vitesse de la lumière change t- elle en fonction de l'étoile étudiée ?

Pour résoudre ces questions son idée est la suivante. Dans le modèle corpusculaire les particules lumineuses émises avec la vitesse c par l'étoile (qui a éventuellement une vitesse propre dans l'espace absolu) sont reçues sur Terre avec la vitesse $(c + v)$ si l'on fait la mesure à un instant où la Terre va

à la rencontre des rayons lumineux et $(c - v)$ si la lumière de l'étoile rattrape la Terre dans son périple autour du Soleil. Pour se placer dans le premier cas Arago vise le matin, vers 6h, une étoile proche du méridien et placée dans une direction voisine de celle de la vitesse de la Terre dans son mouvement autour du Soleil. Pour le second cas, il opère le soir vers 18h et vise de la même façon

²¹ Toutes les Académies Royales avaient été supprimées par la Convention en 1793. En 1795 est créé l'Institut national qui comprend trois classes : « Sciences physiques et mathématiques », « Sciences morales et politiques » et « Littérature et beaux-arts ». En 1816, la Restauration leur restitue le nom d'Académie et en 1836 François Arago met en place les CRAS (Comptes Rendus de l'Académie des Sciences).

²² CRAS n° 36 (1853) page 38 - 49

des étoiles situées à proximité du méridien mais dans une direction opposée à celle de la vitesse de la Terre.

La différence de vitesse entre ces deux séries de mesures va se manifester dans un changement de valeur pour les angles de réfraction de la lumière arrivant sur la face d'entrée d'un prisme placé à l'avant d'une lunette. Il utilise donc un prisme achromatique²³ et présente deux méthodes utilisées qu'il a utilisées. Pour la première, il écrit « *Les choses étant ainsi disposées, j'ai mesuré dans la même nuit, et à différentes époques, les distances au zénith d'un grand nombre d'étoiles ; ces distances, comparées à celles qu'on aurait observées à travers l'air, donnent la quantité de la déviation que le prisme fait éprouver aux rayons lumineux* ».

Dans une autre série de mesures²⁴, il change de méthode comme il l'indique dans la suite de son écrit : « *J'ai ensuite collé ensemble deux prismes achromatiques, semblables à celui qui avait servi à mes premières expériences; mais, afin de me rendre indépendant, dans ces nouveaux essais, de la connaissance de la déclinaison des étoiles, de celle de l'erreur de collimation qui peut varier dans nos instruments, avec la hauteur de la lunette et de la réfraction, j'ai suivi dans l'observation une méthode différente de la première. Le nouveau prisme dont je viens de parler était fixé à la lunette d'un cercle répétiteur, de manière cependant que la moitié de l'objectif fût découverte; je pouvais, par cette disposition, observer tantôt à travers l'air, et tantôt à travers le prisme: la différence des deux hauteurs corrigée du mouvement de l'étoile dans l'intervalle des deux observations, me donnait ainsi la déviation sans qu'il fût nécessaire de connaître exactement la position absolue de l'astre observé.[...] la vitesse de translation de la Terre est précisément égale à [1/10000 de celle de la lumière]; on sait d'ailleurs que son mouvement est dirigé vers les étoiles qui passent au méridien à 6 heures du matin et vers celles qui passent à 6 heures du soir, de telle sorte cependant qu'elle s'approche des premières et qu'elle s'éloigne au contraire des autres. La déviation, dans le premier cas, doit donc correspondre à la vitesse d'émission augmentée de sa 1/10000 partie, et, dans le second, à cette même vitesse diminuée de 1/10000; en sorte que les rayons d'une étoile qui passe au méridien à 6 heures du matin, doivent être moins fortement déviés que ceux d'une étoile qui passe à 6 heures du soir, d'une quantité égale à celle qu'occasionne 1/10000 de changement dans la vitesse totale* »

Le calcul de la déviation attendue sera donné à la fin du rapport, dans la partie consacrée à l'étude des résultats obtenus.

La publication d'Arago contient ensuite un tableau donnant la déviation du prisme utilisé pour plusieurs étoiles qui, le 8 octobre 1810, étaient visibles à proximité du méridien soit le matin soit le soir :

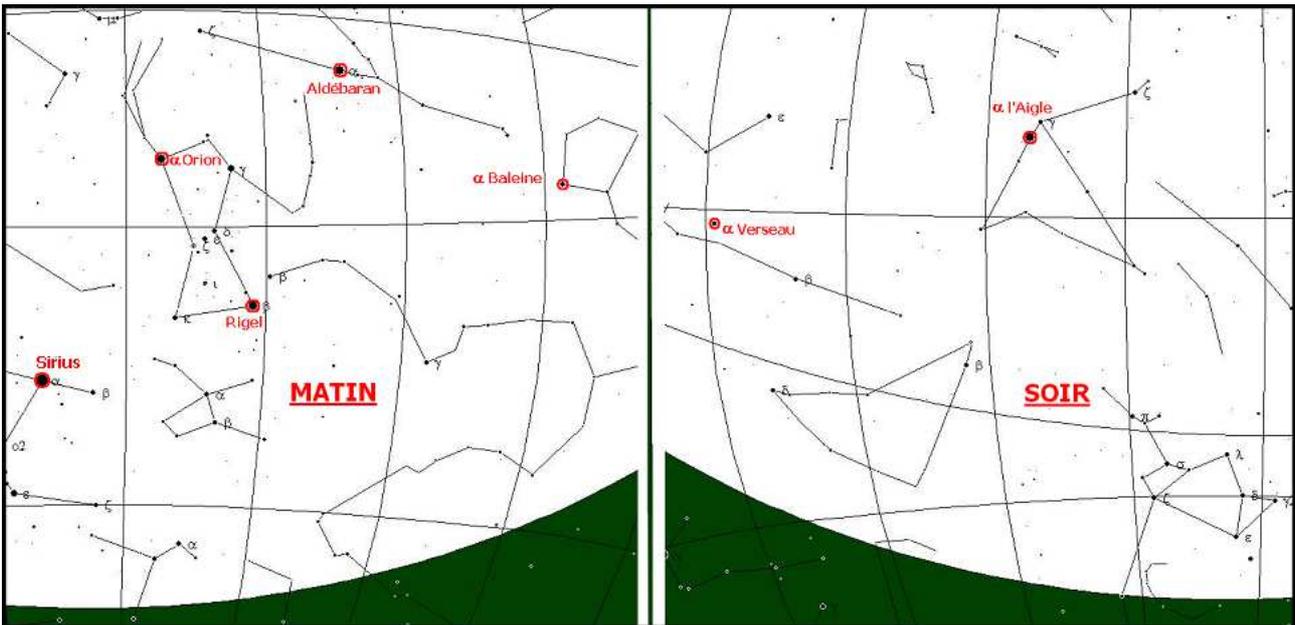
²³ En 1810 Arago ne souhaitait mesurer que la déviation du faisceau lumineux en provenance de l'étoile et pensait être gêné par la dispersion avec un prisme non achromatique alors qu'il aurait pu voir le décalage des raies s'il avait eu connaissance de leur existence et de l'effet Doppler – Fizeau. En 1853, date de publication du document, Arago connaît l'existence des spectres de raies – découverts en 1814 par Fraunhofer – et du décalage en fréquence découvert en 1841 par Doppler et complété par Hippolyte Fizeau en 1849. Mais à cette date Arago est malade : il mourra quelques mois plus tard et n'a plus le dynamisme qui lui aurait permis de prolonger ces travaux de 1810.

²⁴ Nous nous limiterons par la suite à la seule étude de cette deuxième méthode et de ses résultats.

Au cercle répétiteur, 8 octobre 1810.

α de l'Aigle, déviation.....	= 22° 25' 9"
Tache de la Lune.....	= 22° 25' 9"
α du Verseau.....	= 22° 25' 2"
α Baleine.....	= 22° 25' 3"
Aldébaran.....	= 22° 25' 0"
Rigel.....	= 22° 24' 59"
α d'Orion.....	= 22° 25' 2"
Sirius.....	= 22° 25' 8"

Arago ne précise pas dans son rapport l'heure des mesures mais, en s'aidant d'un logiciel de cartographie stellaire, on peut différencier les deux moments de cette journée et vérifier la présence de ces objets dans le ciel parisien.



Arago est donc bien dans des conditions d'observation lui permettant de vérifier ses hypothèses. Or les résultats obtenus ne montrent aucune variation significative : « On voit [...] que les inégalités de déviations sont en général fort petites et du même ordre que celles que présentent les observations faites sans prisme: on peut, par cette raison, les attribuer aux erreurs d'observations; [...] en examinant attentivement les tableaux précédents, on trouve que les rayons de toutes les étoiles sont sujets aux mêmes déviations, sans que les légères différences qu'on y remarque suivent aucune loi»

Pour mieux asseoir cette affirmation, François Arago recherche quelle devrait être la déviation attendue avec le matériel utilisé. Il calcule que dans le cas de la série de mesures donnée ici « ... 1/10186 de variation dans la vitesse de la lumière, devait produire [...] un déviation égale à [...] près de 14" dans le prisme achromatique quadruple que j'ai appliqué à la lunette du cercle répétiteur. » Donc entre les mesures du matin et celles du soir il devrait exister une différence dans les déviations de 28" que l'on ne détecte pas dans le tableau dressé par Arago.

Pour ce dernier « Ce résultat semble être, au premier aspect, en contradiction manifeste avec la théorie newtonienne de la réfraction, puisqu'une inégalité

réelle dans la vitesse des rayons n'occasionne cependant aucune inégalité dans les déviations qu'ils éprouvent. ».

Dans une vision newtonienne du monde dans laquelle la lumière est formée de particules émises à grande vitesse par une source stellaire, il n'y a pas de place pour l'hypothèse d'une constance de la vitesse de la lumière quelle que soit celle de la source. Arago va donc devoir trouver une explication compatible avec son modèle. Il va émettre alors l'hypothèse « [...] *qu'on ne peut en rendre raison qu'en supposant que les corps lumineux émettent des rayons avec toutes sortes de vitesses, pourvu qu'on admette également que ces rayons ne sont visibles que lorsque leurs vitesses sont comprises entre des limites déterminées : dans cette hypothèse, en effet, la visibilité des rayons dépendra de leurs vitesses relatives, et, comme ces mêmes vitesses déterminent la quantité de la réfraction, les rayons visibles seront toujours également réfractés. »*

Les découvertes récentes de rayonnements invisibles – rayons infrarouges par Herschell en 1800 et rayons ultraviolets par Wollaston et Ritter en 1802 – le renforcent dans cette voie : « *Il ne sera peut-être pas inutile de noter que les observations dont je viens de rendre compte et la supposition qui les explique, se lient d'une manière très-remarquable aux expériences de Herschel, Wollaston et Ritter. Le premier a trouvé comme on sait, qu'il y a en dehors du spectre prismatique et du côté du rouge, des rayons invisibles, mais qui possèdent à un plus haut degré que les rayons lumineux la propriété d'échauffer; les deux autres physiciens ont reconnu, à peu près dans le même temps, que du côté du violet il y a des rayons invisibles et sans chaleur, mais dont l'action chimique sur le muriate d'argent et sur plusieurs autres substances est très-sensible. Ces derniers rayons ne forment-ils pas la classe de ceux auxquels il ne manque qu'une petite augmentation de vitesse pour devenir visibles, et les rayons calorifiques ne seraient-ils pas ceux qu'une trop grande vitesse a déjà privés de la propriété d'éclairer?* » Arago admet cependant que son hypothèse, bien que probable, n'a pas été prouvée par ses expériences et qu'il reste un doute sur sa véracité « *Cette supposition, quelque probable qu'elle puisse d'abord paraître, n'est pas rigoureusement établie par mes expériences, dont il est seulement permis de conclure que les rayons invisibles par excès et par défaut de vitesse occupent respectivement sur le spectre la même place que les rayons calorifiques et chimiques. »*

Arago connaît bien sûr le modèle ondulatoire mais ce dernier, en 1810, reste qualitatif et ne permet pas de calculer les effets d'un prisme sur la lumière : « *Je n'ai point comparé, dans ce qui précède, mes expériences au système des ondulations, parce que l'explication qu'on donne de la réfraction repose, dans ce système, sur une simple hypothèse qu'il est très-difficile de soumettre au calcul, et qu'il m'était, par suite, impossible de déterminer d'une manière précise si la vitesse du corps réfringent doit avoir quelque influence sur la réfraction, et, dans ce cas, quels changements elle doit y apporter. »* Il faudra attendre les développements mathématiques considérables qu'apportera **Augustin Fresnel** (1788 / 1827) à partir de 1815 pour qu'on ait la possibilité d'analyser l'expérience dans ce cadre là. Curieusement ceci ne sera pas réalisé. Rappelons que ce rapport, présenté par Arago devant les membres de l'Institut en décembre 1810, sera ensuite totalement « oublié » par ce dernier

qui ne le retrouvera qu'en 1853, peu avant sa mort, pour publication sans aucune modification ni ajout par le savant ou un de ses collègues.

3.7 La révolution fresnelienne

Par la suite, la physique va vivre entre 1810 et 1830 une crise où les affrontements, parfois très vifs, entre partisans des deux théories en présence vont déchirer quelques temps la communauté scientifique, en particulier en France. D'un côté, nous avons les adeptes de la théorie corpusculaire avec, en tête, Laplace accompagnés de Biot, **Gay Lussac**, **Charles**, **Berthollet**, **Poisson** et, de l'autre, Arago et un nouveau venu sur la scène, Augustin Fresnel. Ce dernier est passé par l'école des Ponts et Chaussées et Polytechnique. Il profite de ses loisirs pour lire et expérimenter ; son sujet favori : la lumière. Plus ses réflexions avancent et plus la théorie corpusculaire lui paraît déraisonnable. Il entre en contact avec Arago qui semble avoir « oublié » son mémoire de 1810 et deviendra rapidement son soutien le plus fidèle.

Convaincu de la validité de la thèse ondulatoire, il calcule les différents effets que cette dernière entraîne en s'appuyant sur trois hypothèses :

- les vibrations lumineuses sont sinusoïdales
- la diffraction correspond à la superposition de l'onde principale et des ondelettes secondaires réémises par l'obstacle (hypothèse qu'il sera amené à corriger)
- les ondes peuvent se renforcer ou s'annihiler selon leur relation de phase (terme inventé par Fresnel)

Il retrouva alors par le calcul la position et la forme (hyperbole) des franges successives de diffraction. Enthousiasmé par ses résultats, il rédige un mémoire où il explique également la réflexion, la réfraction, les interférences, les couleurs, et l'envoie à Arago. Ce dernier est tout de suite intéressé mais entrevoit également la forte opposition qu'ils vont devoir affronter. Fresnel se remet au travail, fait de nouvelles expériences dans lesquelles il travaille en lumière monochromatique. Il avance également sur le plan théorique et perfectionne ses hypothèses.

Grâce à ses calculs, il est le premier à déterminer la répartition de l'intensité lumineuse dans les franges de diffraction. Les newtoniens sont sur la défensive. Pour trancher entre les deux théories, l'Académie des sciences ouvre un concours, en 1819, en proposant aux participants de fournir la meilleure étude sur la diffraction. Deux dossiers sont déposés dont celui de Fresnel qui développe longuement une argumentation extrêmement fouillée. Dans ce document apparaît le principe appelé maintenant de Huygens-Fresnel : « *les franges sont dues aux interférences des ondelettes en provenance de chaque point du dispositif diffractant* ». Poisson déduit de ce mémoire une conséquence invraisemblable : le centre de l'ombre d'un écran opaque circulaire peut être éclairé. Dans son esprit une telle absurdité signe l'arrêt de mort de la théorie de Fresnel. Il fait l'expérience : Fresnel avait raison ! C'est le triomphe.

Il reste une ombre au tableau : la polarisation. Fresnel a l'idée, avec Arago, de faire interférer des ondes polarisées. Lorsque ces dernières sont parallèles (deux rayons ordinaires ou deux rayons extraordinaires), rien de nouveau apparaît. La surprise jaillit lorsqu'ils réalisent l'expérience avec deux rayons polarisés perpendiculairement : les franges disparaissent ! Après de longs moments de réflexion, Fresnel aboutit à la conclusion que les ondes lumineuses ne sont pas longitudinales mais transversales. Cette idée fondamentale était déjà en germe dans son mémoire de 1819 mais Fresnel n'avait pas osé la développer car elle avait des conséquences difficilement acceptables à propos du milieu dans lequel se propage la lumière : **l'éther luminifère**. Ce dernier aurait dû avoir des propriétés empruntées d'une part au fluide (pénétration de la matière) et d'autre part au solide (transmission des ondes transversales). Il devenait très difficile de se faire une idée concrète de ce « matériau ». Une partie importante des recherches de la physique de tout le XIX^e siècle sera consacrée à l'étude de ce milieu « mystérieux ».

Fresnel, passe les dernières années de sa vie - il sera emporté par la tuberculose en 1827 - à réfléchir sur l'éther et ses propriétés. Ce milieu est censé baigner tous les corps transparents ainsi que le vide. Il est considéré comme un véritable fluide doté de propriétés mécaniques. Sa « densité²⁵ » est supposée variable selon les milieux afin d'expliquer la réfraction. Pour expliquer, dans le cadre de la théorie ondulatoire, le phénomène de l'aberration stellaire, il faut également supposer que la Terre, dans son mouvement, n'entraîne pas l'éther ou, tout du moins, ne l'entraîne que partiellement et ceci dans une proportion très faible. Dans ce cas la lumière provenant d'une étoile et traversant la lunette d'observation ne participe pour ainsi dire pas au déplacement de cette dernière par rapport à l'éther.

Cette question des rapports entre l'éther, milieu omniprésent transmettant les ondes lumineuses, et le mouvement de la source et/ou de l'observateur va occuper une bonne partie du XIX^e siècle. On peut considérer en effet qu'ils obéissent à une des trois possibilités suivantes :

- L'éther n'est pas entraîné par le système ou sous-système en « mouvement²⁶ »
- L'éther est totalement entraîné par ce même système
- L'éther n'est que partiellement entraîné

Pour essayer de faire un choix Fresnel va étudier le problème suivant. Considérons deux ondes lumineuses A et A' émises respectivement par une source S au repos par rapport à l'éther universel que nous noterons (E) , et par une source S' en mouvement. Il fait l'hypothèse raisonnable que l'onde émise par S' se propage dans l'éther (E') - éventuellement entraîné - à la **même vitesse** que celle émise par S dans (E) .

$$c_{(A/E)} = c_{(A'/E')} = c$$

²⁵ Fresnel ne définit pas précisément cette notion de densité de l'éther

²⁶ Au XIX^e siècle la nécessité de définir clairement les référentiels d'étude n'était pas aussi évidente qu'après l'acceptation de la RR

En généralisant à un milieu quelconque plongé dans l'éther et d'indice de réfraction n on aura :

$$c_{(A/E)} = c_{(A/E')} = \frac{c}{n}$$

Supposons maintenant qu'on dispose d'un milieu réfringent en mouvement à la vitesse u par rapport à (E). L'éther (E') peut être entièrement ou partiellement entraîné par rapport à (E) à une vitesse qu'on notera $v_{E'/E}$ telle que :

$$v_{E'/E} = \alpha.u$$

Pour un éther non entraîné : $\alpha = 0$

Pour un éther totalement entraîné : $\alpha = 1$

α est appelé coefficient d'entraînement.

Une onde lumineuse A' traversant un tel milieu aura, par rapport à l'éther universel, une vitesse c' donnée par la loi de composition des vitesses²⁷ :

$$c' = c_{A'/E} = \frac{c}{n} \pm \alpha.u \quad (1)$$

Pour avoir la vitesse de propagation de α par rapport au milieu réfringent (M) on applique là encore loi de composition des vitesses :

$$c'' = c_M = c_{A'/E} - u = \frac{c}{n} \pm \alpha.u \mp u = \frac{c}{n} \pm (\alpha - 1).u$$

Fresnel, poursuivant son raisonnement, va traiter le problème de la propagation d'une onde lumineuse dans un milieu transparent en mouvement comme celui relatif à une onde mécanique. Il lie la densité D de l'éther à la vitesse de l'onde dans le milieu en proposant que le carré de cette dernière soit inversement proportionnel à D . Si D est la densité de l'éther dans le vide et D' dans le milieu de propagation, Fresnel écrit :

$$\frac{D'}{D} = \frac{c^2}{v^2} = \left[\frac{c}{v} \right]^2 = n^2$$

v représente la vitesse de la lumière dans le milieu transparent. On a donc $D' > D$. Pour Fresnel on a donc un excès d'éther dans le milieu par rapport au vide.

Si le milieu est mis en mouvement par rapport à la source lumineuse avec la vitesse u , seule la partie en « excès » de l'éther va être entraînée.

Quelle est alors la vitesse de propagation dans le repère du laboratoire d'une onde se propageant dans un milieu éthéré dont une partie est fixe (éther non entraîné) et l'autre est mobile ? Fresnel détermine alors le mouvement du

²⁷ On applique ici la loi de composition classique dans le cas où les vitesses sont parallèles.

centre de gravité de l'éther entraîné lorsque le milieu est en mouvement en posant :

$$v = u \cdot \frac{(D'-D)}{D} = u \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

sera celle du centre de gravité de l'éther « entraîné ». Il considère ensuite et sans justification particulière que la vitesse recherchée s'obtient en ajoutant algébriquement à la vitesse de propagation de l'onde dans l'éther au repos – c'est à dire c/n – la vitesse du centre de gravité de l'éther entraîné.

L'observateur doit alors mesurer dans son laboratoire une vitesse de propagation de la lumière de la forme

$$v = \frac{c}{n} + u \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad \text{ou} \quad v = \frac{c}{n} - u \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

selon le sens relatif des vitesses du milieu et de la lumière.

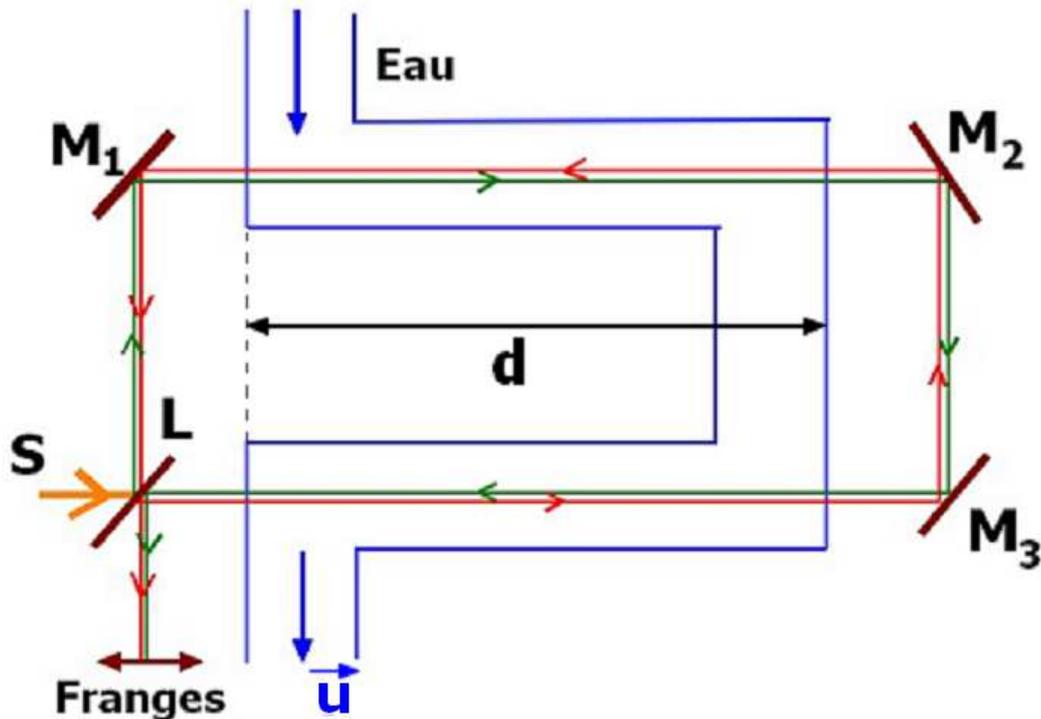
Ce raisonnement, peu rigoureux sur le plan théorique, a l'avantage, d'une part, de proposer une solution pour expliquer le résultat négatif de l'expérience d'Arago : l'éther subit un entraînement partiel de la part des prismes en mouvement placés en sortie de la lunette. D'autre part, il suggère une idée de vérification expérimentale de cette théorie²⁸. Décédé prématurément, Fresnel ne pourra pas le faire et c'est **Hippolyte Fizeau** (1819 / 1896) qui réalisera l'expérience en 1851.

Ce dernier est un physicien qui ne sort pas des grandes écoles. Cependant il est remarqué par Arago - encore lui - en 1842 qui se prend d'amitié pour ce jeune expérimentateur plein de talent. En 1848, à la suite des travaux de l'Autrichien **Christian Doppler** (1803 / 1853), il avait étendu à la lumière la théorie du décalage de fréquence des ondes sonores dans le cas des corps en mouvement et donné une théorie complète de l'effet Doppler - Fizeau.

Pour cette expérience l'idée de Fizeau est la suivante (voir le schéma figurant à la page suivante) : une source monochromatique S envoie un faisceau lumineux sur une lame semi-transparente L. Cette dernière le fractionne en deux - tracés en rouge et vert sur le schéma – qui vont parcourir un même chemin mais en sens opposés dans le système optique. Une partie de ce chemin se fait dans un tube rempli d'eau que l'on peut mettre en mouvement à la demande. Lorsqu'on recompose le faisceau de sortie sur L on crée un système de franges d'interférences. On remarque que, grâce à la lame semi transparente, chaque faisceau parcourt les deux tubes remplis d'eau ce qui permet de doubler l'effet recherché, c'est à dire le déplacement des franges d'interférences. Une telle observation va alors nous renseigner sur le comportement de l'éther par rapport au mouvement de l'eau. En effet on peut supposer que :

²⁸ La question à propos de la nature de la lumière – corpusculaire ou ondulatoire - a été résolue en 1850 par les expériences de Foucault et de Fizeau : la lumière allant plus vite dans l'air que dans l'eau, on en a déduit que la lumière était une onde.

- L'éther n'est pas entraîné par l'eau en mouvement : dans ce cas on ne devrait observer aucune modification de la position des franges lors de la mise en route du courant d'eau. En effet la vitesse de la lumière dans l'eau par rapport à l'observateur reste égale à c/n que l'eau soit au repos ou non.
- L'éther est entraîné - totalement ou partiellement - par l'eau en mouvement : dans ce cas le déplacement des franges est observable et peut être mesuré.



Calculons dans un premier temps la différence de temps de propagation entre les deux faisceaux pour un entraînement total (théorie classique) :

$$\Delta t = \frac{2d}{\frac{c}{n} - u} - \frac{2d}{\frac{c}{n} + u} = \frac{2d \cdot (\frac{c}{n} + u) - 2d \cdot (\frac{c}{n} - u)}{(\frac{c}{n} - u) \cdot (\frac{c}{n} + u)} = \frac{4ud}{(\frac{c}{n})^2 - u^2}$$

La différence de chemin optique est alors :

$$\delta = c \cdot \Delta t = \frac{4cud}{(\frac{c}{n})^2 - u^2} \approx \frac{4cud}{(\frac{c}{n})^2} = 4 \frac{dn^2 u}{c} \quad \text{puisque } u \ll c$$

Finalement le décalage des franges lorsque l'eau circule et qu'on suppose que l'éther est totalement entraîné est :

$$\Delta p = \frac{\delta}{\lambda} = 4 \frac{dn^2 u}{c\lambda}$$

Avec les données du montage de Fizeau on peut anticiper un décalage des franges d'interférence de 0,46 frange. Or Fizeau va observer une valeur plus faible de 0,2.

Voyons maintenant ce que l'on obtient si on considère un entraînement partiel pour lequel on utilise la formule de vitesse de Fresnel :

$$\Delta t = \frac{2d}{\left(\frac{c}{n} - u \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\right)} - \frac{2d}{\left(\frac{c}{n} + u \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\right)} = \frac{4u \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot d}{\left(\frac{c}{n}\right)^2 - u^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)^2} \approx \frac{4u \cdot n^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot d}{c^2}$$

Finalement :

$$\Delta p = \frac{\delta}{\lambda} = 4 \frac{d \cdot n^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot u}{c \cdot \lambda}$$

Le facteur $(1 - 1/n^2)$, dans cette expérience, vaut 0,43. Or, entre le résultat expérimental et le calcul fait avec un éther totalement entraîné, on constate qu'il y a un rapport de $0,2/0,46 = 0,43$ ce qui est précisément ce que la donne la prise en compte de la théorie de Fresnel.

En 1871 **Georges Airy** (1801 / 1892), astronome à l'observatoire de Greenwich, va réaliser une expérience dont le but était de mettre en évidence l'entraînement partiel de l'éther du fait du mouvement de la Terre²⁹ en constatant une éventuelle différence de l'angle d'aberration dans la mesure fournie par deux observations astronomiques réalisées avec le même instrument utilisé dans des conditions différentes. Dans la première manipulation Airy réalisait une mesure avec une lunette vide³⁰ et dans la seconde il déterminait le même angle avec une lunette remplie d'eau. Dans ce dernier cas, l'angle mesuré est l'angle après réfraction dans la lunette. On peut alors remonter à l'angle d'aberration incident par la loi de Descartes en utilisant son expression pour les petits angles, $i \approx n r$. Cet angle de réfraction peut être associé à un coefficient d'aberration déterminé par de nouvelles vitesses : c/n au lieu de c , et $(1 - \alpha) v$ au lieu de v , pour tenir compte de l'entraînement partiel de l'éther par l'eau de la lunette. On obtient ainsi une nouvelle valeur de l'angle d'aberration :

$$\varepsilon' \approx n \cdot \frac{(1 - \alpha) \cdot u}{c/n} = n^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot \varepsilon$$

L'expérience donna $\varepsilon \approx \varepsilon'$, ce qui montrait que le coefficient d'entraînement α avait, là encore, une valeur très proche de celle proposée par Fresnel.

²⁹ Rappelons qu'à cette époque on estime que les étoiles – donc le Soleil – sont pratiquement au repos par rapport à l'éther interstellaire et que la Terre a un mouvement de vitesse v autour du Soleil donc par rapport à l'éther.

³⁰ Il refait donc dans cette première expérience la manipulation de Bradley

Ces expériences ont donné au coefficient d'entraînement de Fresnel le statut d'une vérité expérimentale dont il fallait de toute manière s'accommoder.

Remarquons que l'observation de l'aberration stellaire n'a été rendue possible que parce que la vitesse de la Terre dans son mouvement autour du Soleil change sans cesse de direction. On ne détecte donc que la variation de l'aberration. Pour un mouvement rectiligne uniforme toutes les étoiles verraient leur direction changée de la même valeur et on ne s'apercevrait de rien. D'ailleurs si tout le système solaire avait un mouvement de translation rectiligne par rapport à l'éther ce mouvement ne serait pas détectable.

3.8 L'expérience de Michelson & Morley : la mort de l'éther

Les expériences décrites précédemment donnent aux débuts des années 1870 quelques précisions à propos de l'éther luminifère. Il s'agit d'un milieu vibrant transportant les ondes lumineuses transversales ayant pour de nombreux savants les propriétés suivantes :

- Il remplit la totalité de l'Univers et est « au repos » dans « l'espace absolu »
- Il est très rigide puisque la vitesse des vibrations lumineuses est très grande
- Il est incompressible puisque des vibrations transversales s'y propagent
- Il offre une résistance nulle aux corps qui s'y déplacent comme les planètes
- Il ne semble pas être entraîné³¹ par les objets en mouvement mais l'est partiellement³² par ceux qui sont transparents et traversés par la lumière

On a ici une énumération étrange qui fait de l'éther une substance insaisissable mais dont les savants de cette seconde moitié du XIX^e siècle ne peuvent pas se passer car ils sont incapables d'imager qu'une vibration puisse se propager sans un milieu de propagation. Ils ne sont pas tous d'accord sur ce comportement et une minorité pensent autrement. Pour certains, comme **Georges Stokes** (1819 / 1903), l'éther est entraîné localement par la matière.

Les physiciens vont alors se poser la question suivante : l'existence de l'éther étant maintenant bien « assise » expérimentalement et théoriquement (modèle de Fresnel), peut-on mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à ce milieu ? On a vu un peu plus haut que ça n'était pas le cas avec le phénomène de l'aberration stellaire et, d'une manière générale, les expériences dans lesquelles l'effet recherché était du premier ordre en (v/c) étaient incapables de le faire. Ce sont des manipulations dans lesquelles la source et/ou l'observateur ne sont pas liés au système en mouvement. Dans le cas où l'on cherche à mesurer des différences dans la vitesse de la lumière il est nécessaire de le faire dans un référentiel en mouvement auquel sont rattachés la source ET le récepteur pour y parvenir. Cependant pour de telles expériences les effets recherchés sont alors du second ordre en (v/c) c'est-à-dire proportionnels à v^2/c^2 qui, dans le cas du mouvement de la Terre à travers l'éther « immobile » dans « l'espace absolu » vaut $(30/300000)^2$, ou 10^{-8} !

³¹ Propriété donnée par l'observation de l'aberration stellaire par Bradley

³² Propriété fournie par les expériences d'Arago, de Fizeau et d'Airy

En 1879 **Albert Michelson** (1852 / 1931) travaillait au National Almanac Office de Washington, aux USA. Au mois de mars son collègue **David Todd** (1855 / 1939) avait reçu une lettre de **James Clerk Maxwell** (1831 / 1879) dans laquelle ce dernier lui demandait si des observations sur les satellites de Jupiter, réalisées soit le matin soit le soir, pourraient être faites avec une précision suffisante pour révéler des changements dans la vitesse de la lumière provoqués par le mouvement de la Terre à travers l'éther. Maxwell expliquait également que sa méthode ne nécessitait qu'une précision de l'ordre de v/c , tandis que toutes les expériences purement terrestres de détermination d'un

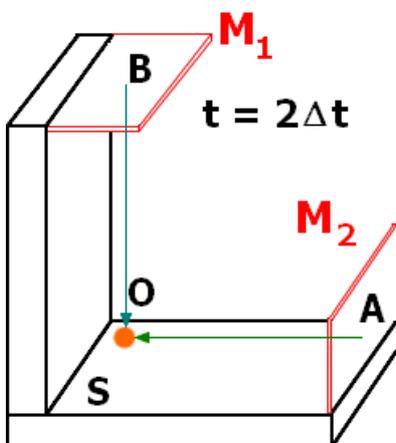
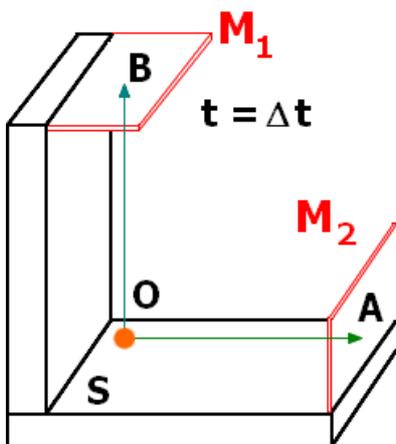
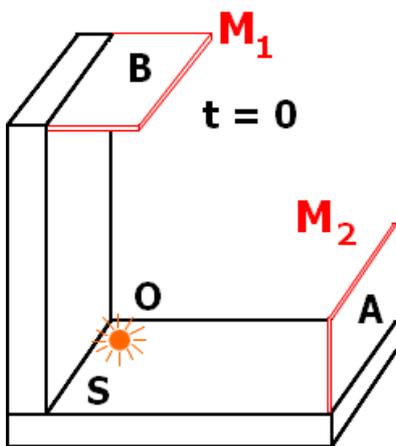
« vent d'éther » exigeaient une sensibilité en $(v/c)^2$ beaucoup plus grande. Il ajoutait qu'aucun appareil existant alors n'était capable de répondre à une exigence aussi sévère.

Mis au courant de cette lettre par son collègue Todd, Michelson décide de relever le défi et de mettre au point un dispositif permettant une telle mesure. Pour atteindre la précision nécessaire seul un appareil utilisant les interférences est envisageable.

Le principe est le suivant³³ : deux faisceaux monochromatiques perpendiculaires entre eux et issus d'une même source S se réfléchissent sur deux miroirs M_1 et M_2 . Ils parcourent alors, selon un aller-retour, deux chemins différents de même longueur L. En recombinant les deux faisceaux en O, voisin du point de départ³⁴, ces derniers vont interférer et la moindre modification dans les temps de parcours pourra être mise en évidence. On remarque ici que Michelson utilise deux dispositifs identiques qu'on retrouvera plus tard en étudiant la relativité restreinte : l'horloge de lumière. On a donc bien un dispositif « interne » : la source et le dispositif d'observation sont au repos dans un même référentiel.

Comme on le voit sur le schéma ci-contre, si on ne tient pas compte du mouvement du dispositif dans l'éther, les deux faisceaux mettent le même temps pour faire chacun leur aller-retour.

Tenons compte maintenant de la vitesse de déplacement du système embarqué par rapport à l'éther de telle façon que l'horloge lumineuse OA soit parallèle à ce mouvement et l'autre OB

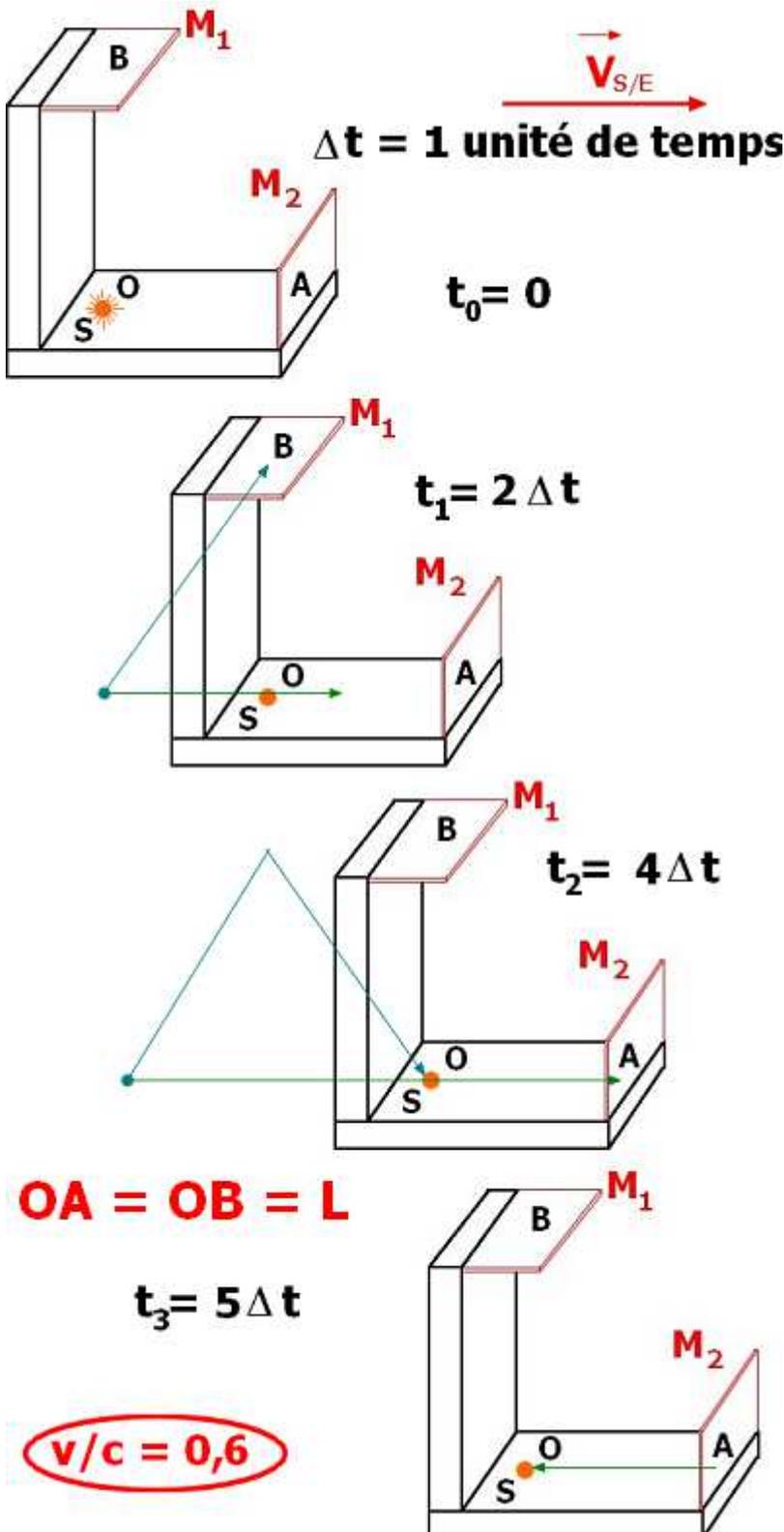


³³ On remarque ici que Michelson utilise deux dispositifs identiques qu'on retrouvera plus tard en étudiant la relativité restreinte : l'horloge de lumière.

³⁴ Comme on le verra un peu plus loin, Michelson sépare les deux faisceaux à partir d'une source unique et les recombine pour qu'ils interfèrent à l'aide d'une lame semi-transparente.

perpendiculaire.

Pour cela représentons sur la figure suivante le dispositif aux mêmes instants que précédemment : départ de la lumière, réflexion en A et B et retour en O. Pour mieux illustrer notre propos nous considérons sur le schéma que la vitesse du dispositif obéit à un rapport v/c de 0,6. Rappelons également que ce qui suit est un raisonnement fait dans le cadre de la **mécanique classique**. Par la suite le faisceau (bras) OB sera désigné par « faisceau (bras) (1) » et le faisceau (bras) OA par « faisceau (bras) (2) ».



Si nous nous plaçons dans le référentiel de l'éther le bras (1) va se déplacer de $V \cdot t_1$ avant que la lumière n'atteigne le miroir M_1 en B. On peut alors écrire :

$$c^2 t_1^2 = V^2 t_1^2 + L^2$$

On peut donc calculer t_1 .

$$t_1 = \frac{L}{\sqrt{c^2 - V^2}} = \frac{L}{c \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}$$

A partir de B le faisceau (1) est réfléchi et revient vers le point O qu'il atteint à l'instant t_2 . La durée du trajet retour étant égale à celle du trajet aller on a :

$$t_2 = 2t_1 = \frac{2L}{c \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}$$

Dans le cas général - différent éventuellement de celui de la figure - le temps que met le faisceau (1) pour revenir en O n'est pas forcément égal à celui que met le faisceau (2) pour parvenir en A. Cette dernière durée sera désignée par t'_2 . L'horloge OA va alors parcourir la distance $V \cdot t'_2$ dans l'éther et la lumière la distance $c \cdot t'_2$ pour atteindre le point A. On a alors :

$$L = c.t'_2 - V.t'_2 = (c - V).t'_2$$

$$t'_2 = \frac{L}{c - V} = \frac{L}{c.(1 - \beta)}$$

Le retour se fait entre t'_2 et t_3 tel que :

$$L = c.(t_3 - t'_2) + V.(t_3 - t'_2)$$

$$L = (c + V).(t_3 - t'_2)$$

$$t_3 - t'_2 = \frac{L}{c + V} = \frac{L}{c.(1 + \beta)}$$

La durée de l'aller / retour du faisceau (2) est donc $t_3 = t'_2 + (t_3 - t'_2)$ tel que :

$$t_3 = \frac{L}{c.(1 - \beta)} + \frac{L}{c.(1 + \beta)} = \frac{2L}{c.(1 - \beta^2)}$$

La différence de temps et de chemin optique entre les aller / retours des deux faisceaux est donnée par les expressions suivantes :

$$(t_3 - t_1) = \frac{2L}{c} \cdot \left[\frac{1}{1 - \beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right]$$

$$\delta = c.(t_3 - t_1) = 2L \cdot \left[\frac{1}{1 - \beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right]$$

Le faisceau (1) parvient donc en O AVANT le (2). Cependant, dans le cas de la mise en évidence du mouvement de la Terre le facteur $\beta^2 = (V/c)^2$ ne vaut que 10^{-8} et l'écart temporel est infime. On peut alors simplifier l'expression précédente en utilisant les formules d'approximation :

$$\delta \approx 2L \cdot \left[1 + \beta^2 - \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \beta^2 \right) \right] = L\beta^2$$

Pour le mettre en évidence Michelson va utiliser un dispositif interférentiel et prendre de nombreuses précautions expérimentales. La difficulté est alors de mettre en évidence cette différence de temps de propagation avec les interférences. Pour cela Michelson fait tourner son dispositif de 90° et échange les positions des bras (1) et (2). On a alors une nouvelle différence de temps de $-\delta$ permettant de calculer la variation entre les deux positions de l'ordre d'interférence Δp :

$$\Delta p = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2L}{\lambda} \cdot \beta^2$$

Les premières tentatives de Michelson se déroulent à Postdam, en Allemagne, en 1881. Il espère une valeur Δp de 0,04 frange mais ne détecte rien. Cependant l'incertitude expérimentale sur cette valeur est de 0,02 et il met ce résultat déconcertant sur le compte d'insuffisances techniques de son montage. Il reprend les mesures à Cleveland, dans l'Ohio, en collaboration

avec **Edward Morley** (1838 / 1923) à partir de 1887. Le montage a été considérablement amélioré : on a un Δp attendu de 0,4 frange et l'incertitude a été abaissée à 0,01. Mais les résultats des mesures, quelque soit le moment de la journée ou de l'année, sont toujours voisins de zéro : tout se passe comme si le vent d'éther n'existait pas.

Une première solution serait de dire que la Terre, dans son mouvement de révolution, l'entraîne totalement avec elle. Malheureusement une telle affirmation va à l'encontre de ce que l'on observe dans d'autres expériences (mesure de l'aberration stellaire, expériences de Fizeau et d'Airy par exemple) pour lesquelles on avait conclu que l'éther n'était pas ou que partiellement entraîné.

Dans le même temps, une autre grave difficulté était apparue sur le plan théorique. Les travaux de plusieurs générations de savants (Coulomb, Volta, Ampère, Faraday et bien d'autres) en électricité, magnétisme et optique avaient abouti en 1864 à la magnifique synthèse de Maxwell contenant les équations de l'électromagnétisme. Or ces dernières ne sont pas compatibles avec les transformations de Galilée et ses conséquences, en particulier la loi de composition des vitesses. En effet les équations de Maxwell ne sont pas toutes invariantes par changement de référentiel galiléen, c'est à dire quand on leur applique les transformations de Galilée : le principe de relativité galiléenne ne s'applique pas à l'électromagnétisme.

De plus, une des conséquences la plus importante des équations de Maxwell est la prédiction de l'existence d'ondes se propageant dans le vide à la vitesse c . On peut alors se demander par rapport à quel référentiel cette vitesse est définie. Maxwell et ses successeurs comme **Heinrich Hertz** (1857 / 1894), **Hendrik Lorentz** (1853 / 1928), **Henri Poincaré** (1854 / 1912) pensent toujours qu'il s'agit de l'éther luminifère mais ils n'expliquent pas tous de la même façon les incohérences présentées un peu plus haut.

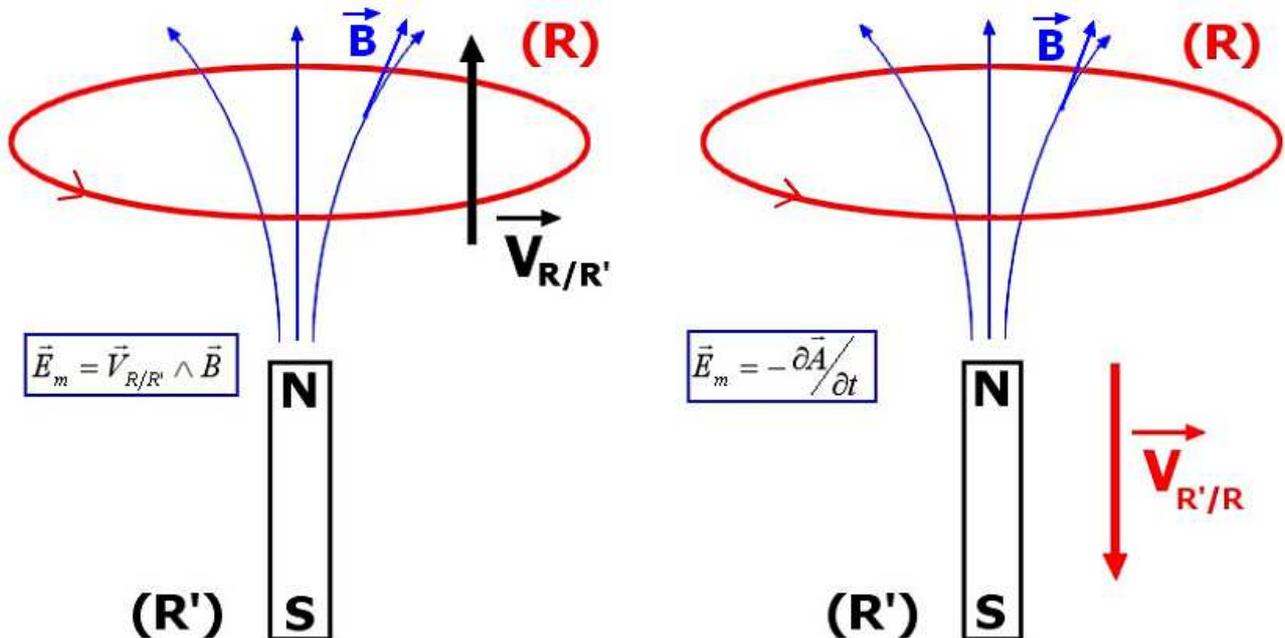
Plusieurs réponses sont données à cet imbroglio à la charnière des XIX^e et XX^e siècle :

- L'expérience de Michelson & Morley est faussée par un phénomène expérimental : l'entraînement local de l'éther au voisinage de la Terre (théorie de Stokes). Cette hypothèse n'est pas conciliable avec une expérience de Fizeau qui avait refait son expérience avec un courant d'eau en remplaçant cette dernière avec de l'air sans rien observer.
- Les lois de l'électromagnétisme doivent être modifiées en considérant que la vitesse de la lumière n'est pas constante par rapport à l'éther mais par rapport à sa source (théorie de l'émission de Ritz). Cette explication entre en conflit avec l'observation des étoiles doubles.
- L'existence du vent d'éther est caché par des phénomènes annexes qui en compensent exactement les effets. A partir de 1892 Lorentz, soutenu plus tard par Poincaré, va élaborer une théorie faisant intervenir une contraction des longueurs suivant le sens du mouvement dont l'hypothèse avait déjà été proposée par FitzGerald. Ce véritable effet physique aurait dû avoir une influence sur le résultat de plusieurs expériences d'électromagnétisme.

Malheureusement ces dernières ne détectent rien et Lorentz doit ajouter une nouvelle hypothèse : la dilatation des durées. L'empilement des hypothèses ad hoc devient une faiblesse pour la théorie de Lorentz malgré les tentatives de Poincaré pour mieux les justifier.

- Les résultats des expériences décrites précédemment ne sont pas à remettre en cause, pas plus que la théorie électromagnétique de Maxwell. Par contre les transformations de Galilée sont fausses et doivent être remplacées par de nouvelles qui permettront de se passer du concept d'éther dont la réalité n'a jamais pu être mise en évidence. C'est la position d'**Albert Einstein** (1879 / 1955) qui rompt définitivement avec la prééminence de la mécanique classique et s'appuie avant tout sur la théorie de l'électromagnétisme dont les équations obéissent « naturellement » au principe de relativité. En 1905 il publie dans les « *Annalen der Physik* » son plus célèbre article « *De l'électrodynamique des corps en mouvement* » qui fonde la relativité restreinte.

Le succès sera dans cette dernière proposition. Albert Einstein, d'une génération plus jeune que ses aînés Lorentz et Poincaré, ne tient pas particulièrement à l'éther. Il est par contre très sensible à la cohérence globale des lois de la Nature et ses interrogations, en ce début du XX^e siècle, ne portent pas sur « l'échec » de l'expérience de Michelson & Morley mais sur le traitement théorique de l'induction électromagnétique. Dans l'expérience du mouvement relatif entre une bobine et un aimant l'explication donnée n'est pas la même selon que l'on considère le mouvement de la bobine dans le référentiel de l'aimant ou celui de l'aimant dans le référentiel de la bobine.



Dans le premier cas les électrons de la bobine se déplacent dans le référentiel **(R')** à la vitesse $\mathbf{v}_{R/R'}$. Ils subissent alors la force de Lorentz donnée par l'expression :

$$\vec{F} = -e \vec{v}_{R/R'} \wedge \vec{B}$$

On peut alors considérer que la charge $-e$ est placée dans un champ électrique appelé champ électromoteur d'induction tel que :

$$\vec{E}_m = \vec{V}_{R'/R} \wedge \vec{B}$$

Sur la seconde figure la bobine est fixe dans **(R)** et le champ magnétique qui la traverse varie dans le temps au fur et à mesure que l'aimant s'éloigne. Il faut alors supposer que la variation dans le temps d'un champ magnétique engendre l'apparition d'un champ électromoteur d'induction.

Pour Einstein une telle distinction n'est pas acceptable ; le principe de relativité doit être étendu à l'ensemble de la physique et non pas limité à la mécanique. De ce fait il ne doit exister qu'une seule explication pour justifier l'apparition du champ électromoteur aussi bien pour un observateur au repos par rapport à la bobine que pour un autre au repos par rapport à l'aimant.

Dès le début de son article Einstein exprime une vision opérationnelle de la mesure du temps et de l'espace. Il écrit : « *Nous devons tenir compte du fait que tous nos jugements où le temps rentre en jeu sont toujours des jugements d'événements simultanés. Si je dis par exemple " ce train est arrivé à sept heures " , je veux dire quelque chose de ce genre " le fait que la petite aiguille de ma montre se trouvait sur le sept et l'arrivée du train sont des événements simultanés " »*. On a ici deux concepts fondamentaux de la relativité restreinte que va définir Einstein : celui d'événement et celui de simultanéité. S'appuyant sur deux principes de base dont chacun semble « inoffensif » :

1. Tous les phénomènes physiques se déroulent de la même façon et obéissent aux mêmes lois dans tous les référentiels d'inertie.
2. La vitesse de la lumière est indépendante de celle de sa source

Einstein va montrer que l'acceptation simultanée de ceux-ci entraîne alors que les transformations de Galilée doivent être modifiées et que la loi classique de composition des vitesses n'est plus valable. Il va construire une théorie « à principe », comme il l'appelle, qui, contrairement à celles qui l'ont précédée, n'a pas été établie pour expliquer les résultats de quelques expériences mais pour constituer un nouveau cadre dans lequel l'ensemble de la physique devra s'intégrer. On a ici ce que les épistémologistes appellent une « méta-théorie ».

Pierre MAGNIEN
Mars 2013

Annexe 1 : Etude de « l'effet Rømer » comme effet Doppler

INTRODUCTION

On peut facilement calculer les résultats donnés dans le texte précédent avec les lois numériques de l'effet Doppler. On admet les deux mouvements circulaires uniformes : celui de la Terre de rayon 1 UA à une vitesse de 30 km/s, celui de Jupiter de rayon 5,3 UA à une vitesse de 14 km/s. La vitesse radiale v_r de Jupiter (par rapport à la Terre) est maximum lors des quadratures et vaut environ 27 km/s : c'est loin d'être négligeable. On peut alors appliquer la formule de l'effet Doppler sachant que Io fait un tour en $T = 42\text{h } 28\text{ min}$:

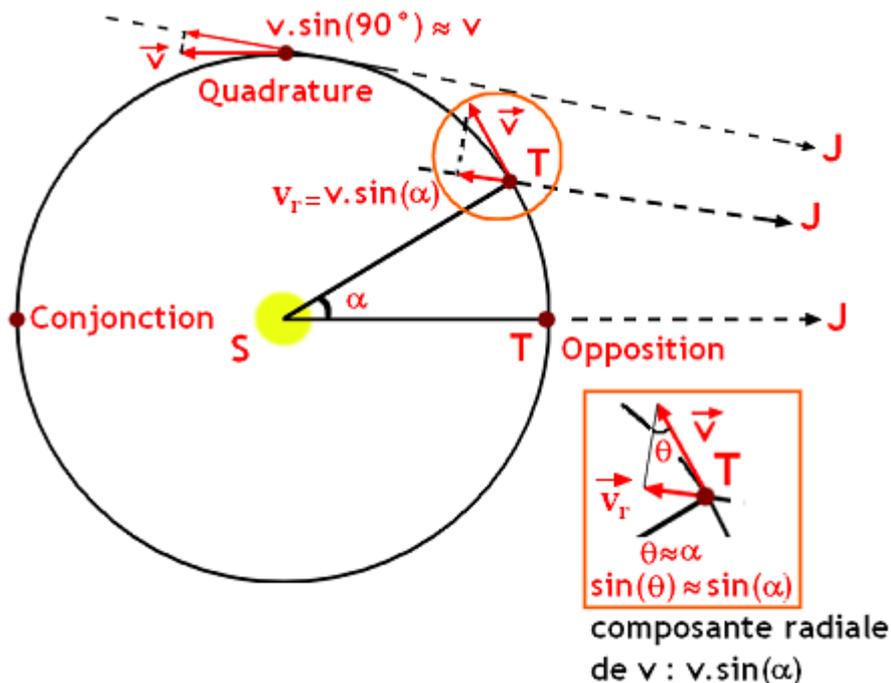
$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{v_r}{c} = \frac{27}{300000} = 9 \times 10^{-5}$$

$$\Delta T = 9 \times 10^{-5} \cdot T = 9 \times 10^{-5} \cdot (42 \times 3600 + 28 \times 60) = 13,8\text{ s}$$

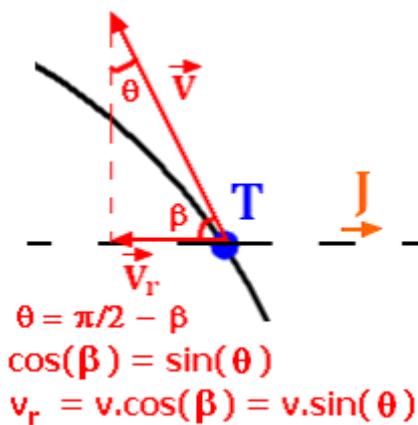
Cette expression donne une diminution ou augmentation maximum de la période de 14s (sur environ 42h et 28 min, c'est à dire 1,769 j). La vitesse radiale est minimum (nulle) lors de la conjonction et de l'opposition. On peut calculer ce retard ou cette avance au cours d'une période synodique et les cumuler pour déterminer l'écart total : on trouve, avec ce modèle très simple, un peu plus de 16 min, ce qui est très voisin des mesures d'aujourd'hui. Voyons cela de plus près.

Calcul de « l'effet Rømer » avec l'effet Doppler

Considérons la figure suivante où est représentée l'orbite terrestre.



On y a considérablement exagéré le changement de direction de la droite TJ tout au long du déplacement de la Terre autour du Soleil. Dans les calculs on estimera qu'elle reste sensiblement parallèle à elle-même (Jupiter à l'infini).



Rappelons la définition de la vitesse radiale sur la figure ci-contre. Vue depuis Jupiter la vitesse radiale de la Terre est la projection du vecteur vitesse de notre planète autour du Soleil sur la droite reliant Jupiter à la Terre. On peut donc écrire :

$$v_r = v \cdot \cos(\beta)$$

$$\text{comme } \theta = (\pi/2 - \beta) \Rightarrow \cos(\beta) = \sin(\theta)$$

$$v_r = v \cdot \sin(\theta)$$

De ce fait la vitesse radiale de la Terre (observateur) par rapport Io (source) est égale à $v \cdot \sin(\alpha)$ avec α angle que fait la direction ST avec sa position pour une opposition de Jupiter³⁵. On estime également qu'entre une opposition et la conjonction suivante Jupiter s'est peu déplacé sur sa trajectoire.

Si T est la période du phénomène observé à « l'émission » et T' à la « réception », on a la relation (voir la figure pour les notations) :

$$T' = T \cdot \left(1 + \frac{v_r}{c}\right) = T \cdot \left[1 + \frac{v}{c} \cdot \sin(\theta)\right] \approx T \cdot \left[1 + \frac{v}{c} \cdot \sin(\alpha)\right]$$

Donc la différence ΔT de période, pour la réception du signal³⁶, par rapport à sa valeur à l'opposition a alors pour expression:

$$\Delta T = T' - T = T \cdot \frac{v}{c} \cdot \sin(\alpha)$$

La valeur maximum de ΔT est obtenue, comme indiqué au début de cette annexe, pour la quadrature et a pour valeur 13,8s. On a alors :

$$\Delta T_{\max} = T \cdot \frac{v}{c} \cdot \sin(90^\circ) = T \cdot \frac{v}{c} = 13,8s \Rightarrow \Delta T = 13,8 \cdot \sin(\alpha)$$

Pour avoir l'écart total τ du phénomène entre une opposition et une conjonction (6 mois dans notre modèle simplifié) il faut intégrer sur cette durée. Durant cet intervalle de temps, Io a effectué $(365,25/2)/1,769 \approx 103$ révolutions et la Terre a tourné de π rd. Durant une avance d'un angle $d\alpha$ de la Terre, Io a effectué un nombre $[103 \cdot d\alpha / \pi]$ de révolution. Le retard $d\tau$ pour $d\alpha$ est alors :

$$d\tau = \frac{103 \cdot d\alpha}{\pi} \cdot \Delta T = 13,8 \cdot \frac{103}{\pi} \cdot \sin(\alpha) = 452 \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha$$

Donc on fera, pour obtenir τ , l'intégration de $d\tau$ pour α compris entre 0 et π .

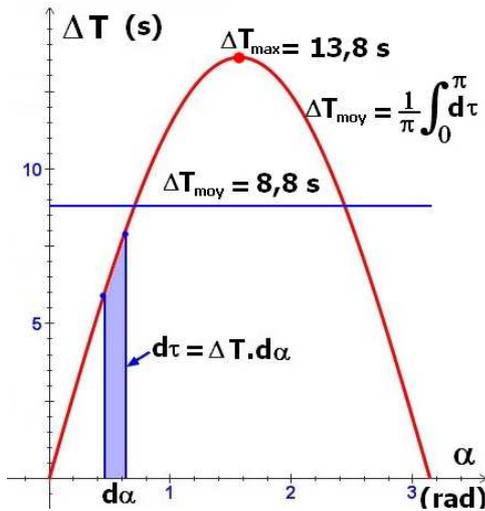
$$\tau = 452 \cdot \int_0^\pi \sin(\alpha) \cdot d\alpha = 452 \cdot [-\cos(\alpha)]_0^\pi = 904s$$

³⁵ Sur la figure on a détaillé dans le rectangle en bas à droite ce qui est présenté dans le cercle le long de l'orbite terrestre.

³⁶ Rappelons que notre signal périodique est équivalent à la réception d'un flash lumineux émis, dans le repère de Jupiter, toutes les 42h et 28 min, c'est à dire à chaque révolution de Io.

On trouve donc, avec notre modèle simplifié, un peu plus de 15 min, proche des 16 min et quelques secondes admis aujourd'hui en valeur moyenne.

Remarque :



On peut également calculer la valeur moyenne ΔT_{moy} comprise entre 0 et 13,8 s de ΔT et multiplier la valeur trouvée par le nombre de révolutions de Io entre une opposition et une conjonction, c'est à dire sur 6 mois.

On peut voir sur la figure ci-contre le calcul de cette valeur moyenne qui vaut 8,8 s. La valeur de t est alors $103 \times 8,8 = 905 \text{ s}$.

Pour mieux comprendre en quoi les observations de Rømer sur Io peuvent être assimilées à l'effet Doppler, cette approche purement analytique peut être remplacé par une étude graphique permettant pleinement de saisir pourquoi les retards et avances constatés dans les début et fin d'éclipses sont bien liés à une grandeur vitesse – élément fondamental de l'effet Doppler – et non pas à une grandeur distance.

Annexe 2 : Tableau comparatif des différents modèles

On peut regrouper dans un même tableau la validité des différentes théories « classiques » en cours au XIX^e siècle pour expliquer les différentes expériences réalisées à propos du comportement de la lumière dans des systèmes en mouvement.

Expériences	Modèle ondulatoire (Ether)						Modèle corpusculaire	
	$c_{L/R} = \frac{c}{n} \pm \alpha \cdot u_{S/E} \mp u_{R/E}$						$c_{L/R} = n \cdot c \pm \alpha \cdot u_{S/R}$	
	Ether NE $\alpha = 0$		Ether PE $\alpha = 1 - 1/n^2$		Ether E $\alpha = 1$			
	$n \neq 1$	$n = 1$	$n \neq 1$	$n = 1$	$n \neq 1$	$n = 1$	$n \neq 1$	$n = 1$
Bradley / Airy $c_{L/R} = \frac{c}{n} \pm (1 - \alpha) \cdot v$	-	+	+	+	-	-	-	+
Arago $c_{L/R} = c \pm \alpha \cdot v$		+		+		-		-
Fizeau $c_{L/R} = \frac{c}{n} \pm (1 - \alpha) \cdot v$	-		+		-		-	
Michelson $c_{L/R} = \frac{c}{n} \pm (1 - \alpha) \cdot v$		-		-		+		+

Notation :

$c_{L/R}$: vitesse de la lumière par rapport au récepteur

$u_{S/E}$: vitesse de la source par rapport à l'éther universel

$u_{R/E}$: vitesse du récepteur par rapport à l'éther universel

$u_{S/R}$: vitesse de la source par rapport au récepteur

(+) : modèle validé

(-) : modèle invalidé

■ : modèle théorique ne s'appliquant pas à l'expérience

On constate que toutes les colonnes contiennent au moins un signe (-) ce qui signifie qu'aucune théorie ne peut expliquer la totalité des observations. Pour palier à cette difficulté Lorentz développa entre 1892 et 1904 une théorie « empilant » les hypothèses ad-hoc conservant l'éther attaché à un référentiel absolu qui est le seul dans lequel la lumière a la vitesse c . La contraction physique des règles et le ralentissement effective des horloges dans les référentiels en mouvement par rapport à l'éther masquent le mouvement relatif à l'éther de l'observateur et/ou de la source lumineuse. L'éther étant indétectable, Albert Einstein décide de trancher « le nœud gordien » en l'éliminant purement et simplement de sa théorie.

On trouvera de nombreux détails sur les expériences citées et les théories développées pour les expliquer dans « **Histoire du principe de relativité** » écrit par Marie-Antoinette Tonnelat chez Flammarion (1971).