

# Regards croisés de l'histoire des sciences et de la didactique de la physique sur le concept d'onde

**Laurence Maurines,**  
maître de conférences, IUFM de Créteil  
**Arnaud Mayrargue,**  
professeur, IUFM de Créteil

## I. Introduction

Après Bachelard (1938), Halbwachs (1974), Piaget et Garcia (1983), de nombreux chercheurs en didactique de la physique font, depuis plusieurs années, un parallèle entre les conceptions et modes de raisonnement utilisés de nos jours par les élèves et une théorie d'une époque historique particulière : en mécanique (Saltiel, 1979, 1987 ; Viennot, 1979 ; Saltiel et Viennot, 1984), en électricité (Benseghir, 1989), en optique géométrique (Galili, 1996), en thermodynamique (Agabra, 1986), dans le domaine des ondes (Maurines, 2001). S'il n'y a aucun sens à chercher un parallèle strict de ce type en raison de la différence des contextes matériels et culturels (on constate non seulement l'existence de similitudes mais aussi de divergences) et d'affirmer que la pensée des élèves évolue en suivant un cheminement historique, il est cependant possible de faire un parallèle d'un autre type. Il s'agit de dégager des difficultés récurrentes, des "*constantes*" pour reprendre un terme de Saltiel (1987), et de montrer qu'aujourd'hui, lors de l'apprentissage d'un domaine particulier, les élèves butent sur des obstacles analogues à ceux rencontrés autrefois par les scientifiques lors de l'élaboration de la physique de ce domaine.

C'est sur l'exemple particulier du concept d'onde que nous allons illustrer ce parallèle. Dans un premier temps, nous présenterons brièvement le pourquoi des études sur les conceptions et modes de raisonnement des élèves, et rapprocherons certaines de leurs caractéristiques des obstacles épistémologiques dégagés par Bachelard lors de son analyse de la transition entre les périodes préscientifique et scientifique. Dans un deuxième temps, nous illustrerons quelques caractéristiques des conceptions et modes de raisonnement des élèves à l'aide de résultats de recherche portant sur la propagation des signaux sur une corde et de signaux sonores. Dans un troisième temps, nous montrerons que celles-ci se retrouvent dans certaines théories du son et de la lumière utilisées autrefois. Nous les détaillerons en particulier à propos du phénomène d'aberration des étoiles. Pour terminer, nous analyserons les ressemblances et différences existant entre les modes de raisonnement utilisés par les élèves et ceux utilisés par nos prédécesseurs. Dans le travail effectué en atelier, nous avons montré comment la connaissance de ce parallèle peut guider l'utilisation de textes historiques en classe.

## II. Modes de raisonnement communs et obstacles épistémologiques

Les didacticiens s'accordent actuellement sur une vision socio-constructiviste de l'apprentissage. Pour eux, l'appropriation d'un savoir nouveau ne résulte pas d'une simple transmission de l'enseignant à l'élève. Celui-ci n'est pas un réceptacle dans lequel on déverse des connaissances : il les construit avec celles qu'il possède déjà, en interaction avec son environnement social.

Cette vision de l'apprentissage a conduit les didacticiens à étudier les idées préalables des élèves dans des domaines spécifiques de la physique. Ils ont alors constaté que :

– beaucoup d'élèves expriment des idées identiques à propos d'une même situation et que certaines idées se manifestent dans davantage de situations que d'autres du domaine considéré. Elles traduisent

l'existence de structures cognitives permettant de donner sens aux informations glanées et éventuellement de fédérer de nouvelles données, les "conceptions".

– des procédures mentales identiques se manifestent de manière transversale à différents domaines de la physique et apparaissent comme des structures plus profondes de la pensée, les "modes de raisonnement".

– cette connaissance "commune" (car partagée à un degré divers par tout le monde) ou "spontanée" (car non apprise en tant que telle) est individuelle, implicite, partiellement structurée et cohérente. Presque jamais conforme à la science enseignée, elle gêne l'accès à la connaissance scientifique et se révèle sur certains points très résistante à l'enseignement. On peut même la retrouver chez des experts.

Les historiens des sciences nous apprennent que la physique est une construction intellectuelle élaborée en réponse à des questions posées par les scientifiques dans le but d'interpréter et de prédire les phénomènes du monde empirique, c'est-à-dire obtenus lors d'observation ou d'expérimentation. Elle se distingue de la connaissance commune en ce qu'elle est explicitée et partagée par une communauté, qu'elle est constituée d'ensembles totalement structurés de concepts, lois et principes : les théories et modèles. Ceux-ci doivent être interprétés sur le plan formel et ne doivent pas être considérés comme la copie d'une situation donnée. Les théories et modèles, représentations hypothétiques du monde empirique, sont provisoires. Des difficultés ont été franchies grâce à des questions nouvelles qui ont conduit à des changements de perspective. Certaines de ces difficultés, qualifiées par Bachelard d'obstacles épistémologiques car provenant de "*l'acte même de connaître*" (Bachelard, 1938), se manifestent fréquemment dans les idées des élèves et étudiants. Il en est ainsi :

– de *l'expérience première* (la première expérience sensible non questionnée) et de *l'obstacle réaliste* (le modèle "colle" à la réalité si bien qu'il n'y a pas à la comprendre, il faut seulement la voir). Beaucoup de recherches en didactique soulignent ainsi "*le primat de la perception sur la conceptualisation*" (Astolfi et Peterfalvi, 1993) ou "*la prédominance de l'intuition sensible*" (Ballini et al, 1997), "*la vision empiriste de la science*" (Guilbert et Meloche, 1993) ou le "*mythe naturaliste*" (Johsua, 1989).

– de *l'obstacle substantialiste* (approche réductrice qui conduit à faire intervenir une substance enfermée dans l'objet et à tout expliquer grâce à elle). C'est ainsi que Viennot note que "*l'idée centrale qui oriente le raisonnement commun est celle d'objet quasi-matériel doué de propriétés intrinsèques*" (1996). De même, pour Resnick (1989), c'est la présupposition matérialiste "*qui amène à supposer que tous les phénomènes physiques doivent être expliqués en fonction des comportements et des propriétés des substances matérielles...C'est à travers les conceptions qu'ont les élèves de la lumière, de l'électricité, de la chaleur et de la température, que la présupposition matérialiste se manifeste le plus souvent*".

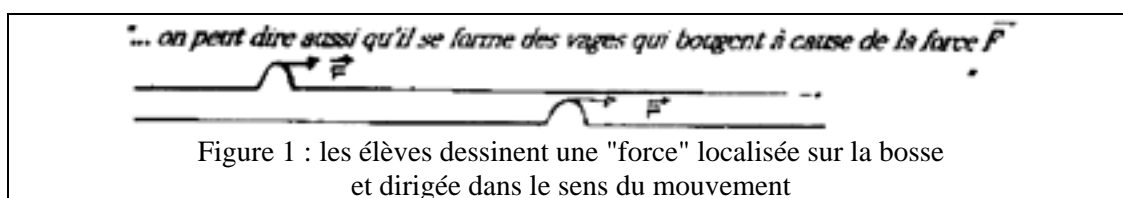
### III. L'obstacle substantialiste dans le raisonnement des élèves

Bien que tous ces obstacles se manifestent dans le domaine des ondes, nous ne nous intéresserons pour des raisons de temps qu'à un seul d'entre eux : l'obstacle substantialiste. Nous allons tout d'abord montrer que, pour expliquer la propagation d'un signal, les élèves et étudiants se centrent sur le signal en déplacement et le traitent comme un objet matériel mis en mouvement par la source qui l'a créé, et qu'une seule notion, concept hybride et rassembleur de grandeurs physiques, permet de rendre compte de cette "mécanique spontanée du signal". Nous analyserons ensuite ce qu'il en découle pour le milieu de propagation. Nous illustrerons ces points à l'aide de résultats de recherche portant sur la propagation d'un signal sur une corde ou d'un son dans l'air. Les élèves et étudiants ont été interrogés à l'aide de questionnaires. Ceux interrogés avant enseignement sur les ondes étaient âgés de 15 à 17 ans, ceux interrogés après enseignement de 17 à 20 ans. Pour plus de détails sur ces recherches, le lecteur pourra se référer à Maurines et Saltiel (1988) et Maurines (1991, 1998).

## A. Le capital, concept hybride, support du raisonnement des étudiants

Pour introduire ce capital, nous allons présenter les résultats de questions portant sur la vitesse de propagation d'un signal sur une corde. Des questions identiques ont été posées pour la propagation d'un son dans l'air et ont obtenu des résultats similaires.

Lorsqu'on demande aux élèves et étudiants s'il y a un moyen de bouger la main qui tient l'extrémité d'une corde allongée sur le sol pour qu'un point de la corde bouge plus tôt, 60% des élèves interrogés avant enseignement sur les ondes (N=42) et 75% après (N=16), répondent positivement. Alors que la vitesse de propagation d'un signal sur une corde ne dépend que du milieu, elle dépend pour ces élèves de la force exercée par la main pour créer le signal. Plus cette force est grande, plus la vitesse l'est : *"la bosse se déplacera de plus en plus vite, si le geste est vif"*, *"la vitesse dépend de la force avec laquelle il a bougé la main"*. De plus, tout semble se passer comme si la force exercée au départ par la main restait attachée au signal et se déplaçait avec lui : *"si l'intensité de la force propagée est plus forte alors la bosse aussi se répandra plus vite"*. Certains schémas (figure 1), fournis en plus des explications, renforcent cette hypothèse. La force qui y est représentée est localisée sur la "bosse", c'est-à-dire sur le signal (et non sur un élément quelconque du milieu). Elle a pour direction celui du mouvement de propagation (et non celui de la tangente à la corde).



Lorsqu'on demande aux élèves et étudiants si des signaux de formes différentes se propagent avec la même vitesse sur la corde, 87% des élèves interrogés avant enseignement (N=93) et 41% après (N=27) répondent que les différents signaux peuvent se propager avec des vitesses différentes. Les justifications montrent que la force communiquée par la source au signal peut être déduite de la forme du signal, plus précisément de son amplitude. Plus l'amplitude du signal est grande, plus cette force est grande et plus la vitesse de propagation l'est : *"la C va le plus vite car la force fournie par le bras de l'enfant modifie la forme de la bosse et la vitesse. Donc plus la force est intense, plus la forme de la bosse sera grande et plus la vitesse sera grande"*, *"cela dépend de la force avec laquelle le mouvement a été fait. Cela se voit selon la grandeur de la bosse. Elle est le reflet de cette force engagée par l'enfant pour arriver à ce résultat..."*.

Lorsqu'on demande aux élèves si la vitesse de propagation d'une bosse qui disparaît avant d'atteindre l'autre extrémité de la corde est constante ou non au cours du temps, 68% des élèves interrogés avant enseignement (N=56) et 55% après (N=42) répondent qu'elle diminue. Pour eux, une diminution d'amplitude indique une diminution de la force communiquée au signal et donc une diminution de la vitesse de propagation : *"la hauteur faiblit car l'action de la main s'atténue"*, *"si la bosse disparaît, c'est que la force qui la faisait disparaît. Pendant ce temps, la vitesse diminue"*.

Ces résultats montrent donc que, pour les élèves, la source semble communiquer quelque chose à la corde lors de la création du signal, quelque chose qui se déplace et reste localisée dans le signal, quelque chose qui détermine l'amplitude du signal et qui peut changer au cours de la propagation. Les élèves l'appellent le plus souvent "force" mais c'est en réalité un concept hybride, mélange de force, d'énergie, de vitesse... Nous avons appelé ce concept hybride CAPITAL car il a de nombreux points communs avec le capital de force introduit par Viennot (1979) pour interpréter les réponses d'étudiants en dynamique élémentaire. Le tableau 1 montre la similitude existant entre les arguments donnés par les élèves et les étudiants pour la propagation d'un signal sur une corde ou d'un son dans l'air, et ceux donnés pour le mouvement d'un objet matériel lancé à la main.

Signaux sur une corde (Maurines et Saltiel, 1988)	Signaux sonores (Maurines, 1998)	Objets (Viennot, 1979)
<i>"si les enfants peuvent donner la même force au départ, alors les formes auront la même vitesse"</i>	<i>"les puissantes ondes de Pierre sont plus rapides que celles de Jean"</i>	<i>"on lui a donné un certain mouvement, une certaine vitesse"</i>
<i>"la vitesse diminue car la force que la main a fournie s'atténue"</i>	<i>"le bruit perd de son intensité et il va moins vite"</i>	<i>"la force que lui a imprimée le bonhomme diminue de plus en plus"</i>
<i>"on ne donne pas tout le temps une impulsion à la bosse pour qu'elle avance"</i>	<i>"le son s'atténue de plus en plus et va donc plus lentement..."</i>	<i>"si une balle continue de monter après qu'on l'a lancé, c'est qu'elle a de la force vers le haut"</i>

Tableau 1 : arguments donnés par les élèves et les étudiants pour expliquer le mouvement d'un objet matériel ou la propagation d'un signal

## B. Conséquences d'un raisonnement en terme de capital

Nous allons à présent montrer qu'un raisonnement en terme de capital conduit les élèves et étudiants non seulement à appliquer au signal une "mécanique" de l'objet matériel, mais aussi à lui attribuer certaines caractéristiques d'un objet.

À une question demandant de tracer au même instant deux signaux se propageant sur deux cordes différentes et obtenus par des mouvements de mains identiques, 60% des 80 étudiants interrogés après enseignement représentent des signaux de largeurs identiques alors qu'elles devraient être différentes car la largeur d'un signal ( $L=VT$ ) dépend non seulement de la source (par  $T$ ) mais aussi du milieu de propagation (par  $V$ ) : *"largeurs identiques si on donne exactement la même impulsion à  $C_1$  et  $C_2$ ", " $C_1=C_2$ , la largeur de la bosse dépend de la durée de l'ébranlement initial"*.

À une question demandant de comparer, dans la même situation, la durée du mouvement de deux repère situés sur chacune des cordes, à même distance des extrémités, 48% des 46 étudiants interrogés après enseignement disent que les durées sont différentes alors qu'elles sont identiques, les mouvements de main l'étant. Pour eux, le repère se trouvant sur la corde de plus grande vitesse de propagation bouge moins longtemps. Les justifications montrent un lien non pertinent entre la vitesse de propagation du signal et la vitesse d'un point du milieu : *"la durée du mouvement de  $R_1$  est plus grande que celle de  $R_2$ , car l'amplitude est la même, mais la vitesse de l'onde en  $R_2$  est plus grande qu'en  $R_1$ "*.

Pour les élèves, un signal est donc caractérisé par une grandeur spatiale (sa largeur) et non temporelle (la durée du mouvement d'un point du milieu). Tout comme la forme d'un objet matériel est indépendante de sa vitesse de déplacement, la largeur d'un signal est indépendante de la vitesse de propagation. Tout comme la durée d'observation d'une voiture en un point de l'espace dépend de sa vitesse de déplacement, la durée du mouvement d'un point du milieu dépend de la vitesse de propagation du signal.

Ce raisonnement mono-notionnel en terme d'objet que l'on suit entraîne que le milieu de propagation est un support passif. Le mouvement d'un point du milieu ne résulte pas d'une interaction avec les points voisins du milieu ayant son origine dans le champ de forces interne au milieu mais de l'existence d'un capital communiqué par la source à ce milieu. Dans le cas du son, le milieu peut même être perçu comme un obstacle à la propagation et comme inutile.

Ainsi, à une question demandant si un son émis par un haut parleur fixé à l'extrémité de quatre tubes de même longueur et constitué de milieux différents (air, eau, acier, "vide") peut être enregistré par le microphone se trouvant à l'autre extrémité, 44% des 108 élèves interrogés avant enseignement répondent qu'un son peut se propager dans le vide : *"oui, le son ne rencontre aucune opposition"*.

Dans les trois autres cas, le pourcentage de réponses indiquant que la propagation est possible diminue avec la densité du milieu (91% des 108 élèves pensent qu'un son peut se propager dans l'air, contre 73% dans l'eau et 30% dans l'acier) : *"oui, sauf l'acier plein parce que le son ne pourra pas traverser le tube plein pour être enregistré", "oui, pour l'air et le vide, car il n'y a pas la présence d'isolant comme l'eau"*. Cette tendance à considérer que la propagation est d'autant plus difficile que le

milieu est dense se manifeste également sur les résultats à une question demandant si le son émis par le haut-parleur se propage avec la même vitesse dans les quatre tubes. Pour 35% des 108 élèves, la vitesse de propagation diminue avec la densité du milieu : *"cela prendra plus de temps pour le tube d'acier que pour le tube où le vide a été fait", "un tube peut être rempli et l'autre pas. Dans ce cas, le son ira plus vite. D'où le classement : vide, air, eau, acier"*.

Parallèlement à cette conception du milieu, on en rencontre une autre dans laquelle la propagation d'un signal s'accompagne d'un déplacement de matière à grande échelle. Celui-ci peut correspondre à un déplacement du milieu lui-même si celui-ci est fluide ("un vent", "un courant") ou de particules qu'il contient. C'est la raison pour laquelle 45% des 108 élèves interrogés avant enseignement répondent que la propagation d'un son est impossible dans le vide (*"non, il n'y a rien dans le tube", "non il n'y a pas de courant pour porter le son"*) et 61% dans l'acier (*"rien ne peut conduire le son", "il reste immobile"*). De même, pour certains d'entre eux, la propagation est possible dans l'eau car *"il y a de l'oxygène"*.

Si ces conceptions erronées sur le rôle du milieu diminuent fortement après enseignement, on les rencontre encore. C'est ainsi que, pour certains élèves, un son se propage dans l'eau *"car le courant et l'air de l'eau portent le son jusqu'au micro"* et ne peut se propager dans l'acier *"car le son ne peut pas traverser l'acier"*. Il est cependant à noter l'apparition d'un autre type de justifications. Si l'essentiel des arguments invoqués par les élèves avant enseignement portent sur le niveau macroscopique, une partie des arguments utilisés par les élèves après enseignement portent sur le niveau microscopique, c'est-à-dire sur les molécules du milieu de propagation. C'est ainsi que pour certains élèves, un son ne se propage pas dans le vide et l'acier car *"le son se propage uniquement dans des milieux où les molécules peuvent bouger. Dans le vide, il n'y a pas de molécules et dans l'acier, les molécules sont fixes"*. De même, pour certains, la vitesse du son dépend du milieu car *"il est freiné par les collisions avec les plus ou moins nombreuses molécules du milieu", "les molécules d'air sont beaucoup plus souples que celles de l'eau"*.

### C. Conclusion

Terminons cette présentation du raisonnement des étudiants en disant que la conception substantialiste de l'onde se retrouve dans nombre d'études portant sur la lumière, par exemple dans celles de Fawaz et Viennot (1986), de Kaminsky (1989) portant sur la formation des images en optique géométrique. Nous ne citerons ici que celle réalisée par Lefèvre (1988) auprès de 176 étudiants en première année d'université scientifique. Pour 30% d'entre eux, *"le fond des mers est sombre car la lumière solaire pénètre à la surface, ralentit et finit par s'arrêter à une certaine profondeur"*. Pour 61% d'entre eux la grandeur qui se conserve lors de la transmission de la lumière d'un milieu à un autre est la longueur d'onde et non la fréquence. A l'occasion d'interviews, certains disent que la lumière se propage d'autant moins vite que le milieu matériel est dense : *"ça va moins vite quand il y a plus d'obstacles. Dans le vide, ça va plus vite. Dans l'air, un peu moins vite. Dans les liquides, encore un peu moins"*.

## IV. L'obstacle substantialiste dans l'histoire de la physique des ondes

Il n'est pas question dans cette partie de faire une étude exhaustive de cette question. Nous montrerons uniquement sur deux points que, dans les idées avancées autrefois par certains scientifiques, on retrouve cette tendance vers des raisonnements mécanistes. Nous commencerons par quelques éléments concernant le son puis continuerons en montrant comment le phénomène d'aberration des étoiles a mis en défaut ce type de raisonnement. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer, par exemple, à Lindsay (1972) pour l'histoire du son et à Ronchi (1956) pour l'histoire de la lumière.

## A. Le son

La conception ondulatoire du son est définitivement admise lorsque Boyle en 1660 réalise l'expérience de la cloche à vide avec un vide suffisant.

Auparavant, une conception corpusculaire du son était encore en vogue. C'est ainsi que :

– Gassendi (1592-1655) pense qu'un son correspond à un jet de petites particules invisibles émises par les sources sonores et que la vitesse du son est égale à la vitesse de ces particules, sa fréquence étant égale au nombre de particules émises par unité de temps.

– Von Guericke (1602-1686) et Kircher (1600-1680) pensent qu'un son peut se propager dans le vide car les expériences de la cloche à vide qu'ils ont réalisées avant Boyle étaient imparfaites.

Une fois la nature ondulatoire du son admise, la question qui intéresse les scientifiques est celle de la dynamique à laquelle obéit la propagation du son.

La dynamique proposée par certains d'entre eux présentent des points communs avec la dynamique de l'objet. C'est ainsi que Newton, dans la première théorie de la propagation du son (1687), fait un bilan de forces, non pas sur un élément infinitésimal du milieu matériel, mais sur un élément du signal lui-même, comme par exemple le cône tronqué  $degf$  de la figure 2 : *"Let the cone APQ be divided into frustums by the transverse planes de, fg, hi. Then, while the ABC, propagating the pressure, urges the conic frustum degf beyond it on the superficies de, and this frustum urges the next frustum fgih on the superficies fh and that frustum urges, and so in infinitum..."*

D'autres, en revanche, montrent que la vitesse du son a des propriétés très différentes de celles d'un solide. Gassendi (1635), Mersenne (1644) et Derham (1708) mesurent la vitesse du son et montrent qu'elle est indépendante de son intensité, de sa fréquence et de sa diminution d'intensité. Poisson, dans son mémoire sur la théorie du son (1808) rappelle qu'Euler a modélisé la propagation du son sur une ligne et a montré que *"la vitesse du son est indépendante de la vitesse des molécules d'air et donc de la cause qui a produit le son"*.

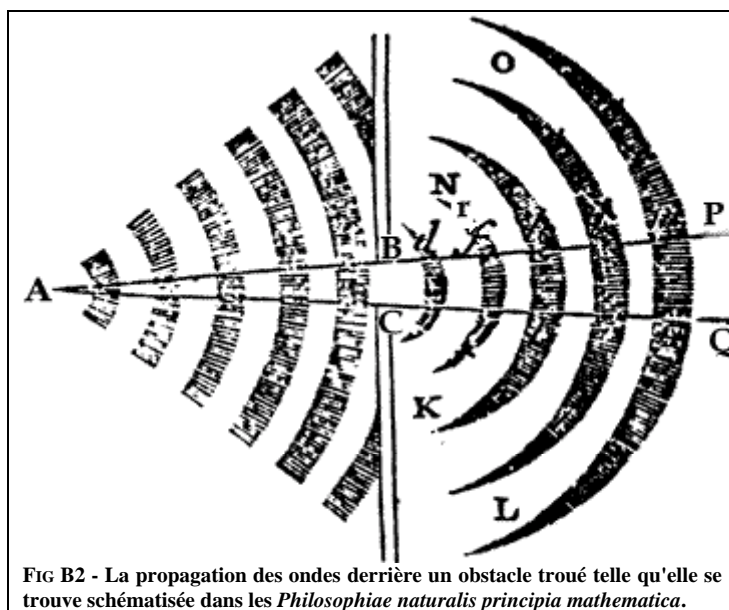


FIG B2 - La propagation des ondes derrière un obstacle troué telle qu'elle se trouve schématisée dans les *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

Figure 2 (tirée de Linsay, 1972, p.76)

## B. La lumière et le phénomène d'aberration des étoiles

### 1. Introduction

L'étude du phénomène d'aberration des étoiles fait appel à différents domaines des sciences : astronomie, mécanique, optique, mathématiques. Ce phénomène, découvert au dix-huitième siècle, est important pour notre propos, parce qu'il a eu au moins deux conséquences :

– à la fois confirmer et infirmer la théorie de la lumière avancée par Newton au dix-septième siècle. Celle-ci suppose que la lumière est constituée de corpuscules de lumière qui se déplacent avec une vitesse finie, et interagissent avec la matière par l'intermédiaire d'une force d'origine gravitationnelle, dont la valeur dépend de leur nature et de leur vitesse. Ainsi, dans le cas du phénomène de réfraction, observé lorsque la lumière traverse une lame de verre, il suffit, selon Newton, d'admettre qu'une force s'exerce perpendiculairement à la surface séparant les deux milieux pour expliquer les changements de direction des rayons lumineux. Lorsque le rayon lumineux « passe » de l'air dans le verre, tout se passe, selon Newton, comme si la force agissait vers le bas ; dans le second cas, c'est l'inverse (voir la figure 3)

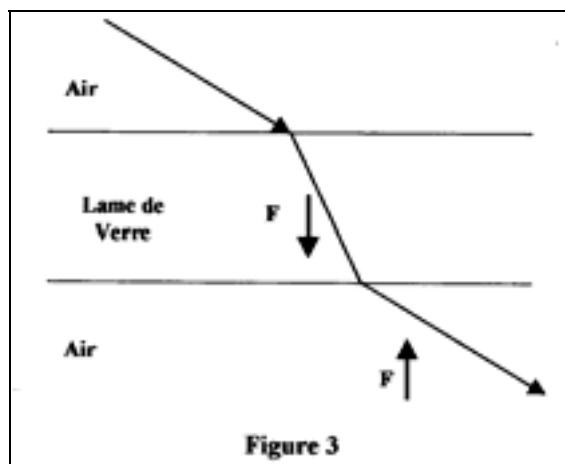


Figure 3

– contribuer, au début du 19<sup>ème</sup> siècle, à l'adoption d'une théorie ondulatoire de la lumière. Celle-ci, élaborée dès le 17<sup>ème</sup> siècle par Huygens, laisse supposer que la lumière se meut sans transport de matière à grande échelle, telle une onde dans un milieu homogène. Ce milieu matériel subtil, c'est l'éther optique.

Dans ce qui suit, nous allons rappeler aussi rapidement que possible ce qu'est le phénomène d'aberration des étoiles et présenter les problèmes soulevés par l'interprétation de ce phénomène dans chacune des deux théories (corpusculaire et ondulatoire). Nous verrons qu'avec l'adoption de la théorie ondulatoire de la lumière va se faire sentir la nécessité d'élaborer une théorie de l'éther, et de sa structure, qui puisse rendre compte de nombreux phénomènes optiques, notamment de la double réfraction et de la polarisation de la lumière. Nous montrerons également que les scientifiques ont eu fréquemment recours à des analogies.

## 2. La bonne étoile de James Bradley

Transportons-nous par la pensée en Angleterre au début du 18<sup>ème</sup> siècle, et voyons ce qui préoccupe les astronomes anglais. Depuis un siècle environ, on sait, après Képler, selon quelles lois les planètes parcourent leurs orbites autour du soleil. Galilée, Huygens et Cassini ont découvert les satellites de Jupiter et de Saturne avec ses anneaux étonnants. Newton enfin a fourni une loi du mouvement qui permet de décrire le système solaire.

Ce qui préoccupe maintenant les anglais, c'est de dresser une carte précise du ciel en déterminant l'emplacement des étoiles, grâce à tous les outils dont ils disposent - la lunette astronomique, le télescope ou l'oculaire de Huygens. Et même, si cela est possible, d'être suffisamment précis pour détecter d'éventuelles variations de ces emplacements, c'est-à-dire pour mettre en évidence l'existence de parallaxes annuelles.

La détermination de ces parallaxes était très intéressante, puisqu'elle devait permettre d'évaluer les distances interstellaires. Mais il existait un autre intérêt à cela, beaucoup moins "technique" celui-là, et finalement plus essentiel : la parallaxe devait confirmer définitivement la théorie héliocentrique de Copernic.

Alors, concrètement, comment procédait-on pour mesurer cette parallaxe ?

Soient E, S, T, respectivement une étoile, le Soleil et la Terre ;  $\alpha$  l'angle que font ET et ES (voir la figure 4).

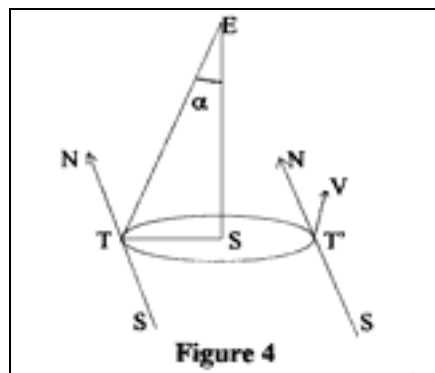


Figure 4

Il s'agissait de mesurer la valeur de l'angle  $\alpha$ , qui représente la parallaxe, où T et T' sont les positions que la Terre occupe à six mois d'intervalle. La connaissance de l'angle  $\alpha$  permettait de connaître la distance SE de l'étoile, puisque  $SE = a/\tan \alpha$ , où  $a$  est la distance de la Terre au Soleil.

Bradley entreprend des observations pour détecter une éventuelle parallaxe et s'aperçoit très rapidement d'un problème important. Il existe bien un déplacement de l'étoile observée, mais pas dans la direction attendue lorsqu'on ne fait intervenir, comme c'était le cas, que les relations spatiales. Dans ce cadre, l'étoile devrait en effet se déplacer dans une direction contenue dans le plan TSE. Or, l'étoile paraît se déplacer dans le plan perpendiculaire au plan TSE.

Après bien d'autres observations et tentatives d'interprétation, Bradley décide de prendre en compte un résultat que Roemer avait donné cinquante auparavant, mais qui n'était encore que peu accepté par les scientifiques, à savoir que la vitesse de la lumière était finie. Ce véritable changement de point de vue lui permet alors de parvenir à donner une explication du phénomène observé :

"Le mouvement était dû au mouvement progressif de la Lumière et au mouvement annuel de la terre sur son orbite."

Ce qui signifie que cet effet, appelé aberration des étoiles, s'obtient en faisant ce que nous appelons aujourd'hui la composition vectorielle de la vitesse «  $c$  » de la lumière issue des étoiles avec la vitesse «  $v$  » de la Terre sur son orbite autour du Soleil. L'écart résultant se situe bien dans un plan perpendiculaire au plan TSE de la parallaxe (voir la figure 5).

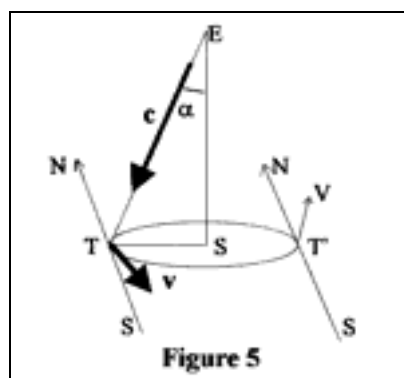


Figure 5

Bradley parvient à un second résultat qui va se révéler avoir des conséquences très importantes en optique. Il s'aperçoit que l'angle d'aberration (voir la figure 6) de toutes les étoiles qu'il observe, a la même valeur  $\theta$ . Pour interpréter cette observation, il procède de la manière suivante : si l'observateur est au repos en A, l'étoile observée E apparaît dans la direction AE. Si l'observateur est en mouvement

de B vers A, puisque le mouvement de la lumière est progressif, et si par exemple il regarde au travers d'un "tube", il doit l'incliner dans la direction BE pour observer l'étoile. Comme, en regardant la figure, nous pouvons remarquer que cet angle  $\theta$  ne dépend que de la vitesse "c" de la lumière issue des étoiles et de la vitesse "v" de la Terre sur son orbite, il en déduit, puisque "v" est constante, que la vitesse de la lumière issue des étoiles est constante, c'est-à-dire indépendante de l'étoile. C'est un résultat surprenant, puisque la théorie newtonienne de la lumière prévoit au contraire « que les rayons lancés au dehors par les vibrations des corps lumineux, étant à peine sortis de sa sphère d'attraction, sont poussés en avant » [42, p. 339] avec une certaine vitesse, selon cette théorie ; la valeur de cette dernière devrait donc dépendre de l'attraction gravitationnelle plus ou moins grande exercée par l'étoile sur les corpuscules de lumière.

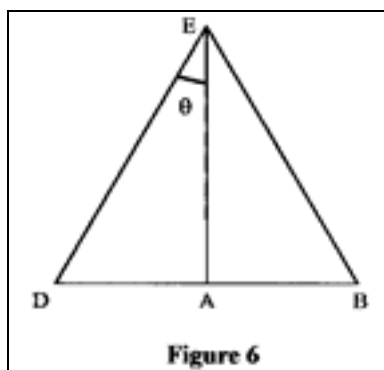


Figure 6

Bradley a ainsi pu donner une explication du phénomène d'aberration des étoiles en se plaçant dans le cadre de la théorie newtonienne de la lumière. Ce résultat a donc contribué à conforter cette dernière. Mais dans le même temps, il a trouvé un second résultat pour le moins étonnant, et en contradiction avec cette même théorie : la vitesse de la lumière est la même pour toutes les étoiles. Ces résultats vont évidemment avoir des conséquences sur le mouvement des idées en optique.

### 3. Le dilemme d'Arago

Le résultat de Bradley sur l'aberration des étoiles va, dans un premier temps - au 18<sup>ème</sup> siècle - conforter, s'il en était besoin, la théorie newtonienne de la lumière. Les quelques irréductibles qui n'avaient pas été convaincus par les résultats de Roemer sur la vitesse de la lumière, c'est-à-dire essentiellement les cartésiens, sont définitivement convaincus du bien-fondé du cadre newtonien. Ils n'ont plus l'argument qu'utilisait Descartes pour rejeter l'idée de propagation non-instantanée de la lumière : celui-ci s'appuyait précisément sur le fait que jamais on n'avait observé un mouvement apparent des étoiles.

Ce mouvement apparent des étoiles fixes, repéré par Bradley, a également pour conséquence de permettre l'adoption définitive de la théorie de Copernic.

Restent en suspens les problèmes soulevés par le second résultat de Bradley sur la vitesse de la lumière issue des étoiles. Clairaut évoque en 1739, ce second résultat, mais s'arrête là. Il n'en tire aucune conséquence. Il faut attendre la fin du 18<sup>ème</sup> siècle pour que naissent des interrogations quant à la nature de la lumière et que se fassent jour des critiques de la théorie newtonienne de la lumière :

– Faut-il penser que la vitesse de propagation de la lumière ne dépend que de la nature et de l'état de la source, ou alors que cette vitesse dépend uniquement du milieu et pas du mouvement de la source ?

– Qui, de Newton, ou de Huygens, "imagine" le mieux ?

C'est dans le cadre de ce questionnement qu'il faut comprendre les expériences qu'Arago entreprend en 1806 et 1810. L'idée remarquable d'Arago est de reprendre le second résultat de Bradley afin de le discuter. L'objet de son expérience, réalisée en 1806 *"était d'examiner si la vitesse de la lumière est constamment la même, quels que soient les corps célestes ou terrestres dont elle émane ou*

*par lesquels elle est réfléchi*"<sup>1</sup>. Il utilise pour cela le phénomène de réfraction de la lumière en observant au travers d'un prisme la lumière issue de diverses étoiles, du Soleil, de la Lune, des planètes, et des lumières terrestres<sup>2</sup>. La théorie de Newton, pour laquelle le phénomène de réfraction dans le prisme permet de séparer les rayons correspondant à des lumières de vitesses différentes, prévoit que les lumières issues de ces différentes sources sont déviées différemment. Or, il constate dans sa première série d'expériences que toutes ces lumières subissent la même déviation quand elles traversent le prisme. Dans une seconde série d'expériences, réalisées en 1810, il prend en compte le mouvement de la Terre sur son orbite et parvient au même résultat négatif.

De deux choses l'une : ou bien le mouvement de la lumière est uniforme et la théorie de Newton sur la réfraction est correcte mais ses idées sur l'émission de la lumière fausses ; ou bien une égalité de déviation de la lumière par un prisme ne correspond pas à une égalité de vitesse des corpuscules et la théorie de la réfraction de Newton est fausse.

#### **4. Fresnel : propositions nouvelles**

Arago s'adresse à Fresnel pour lui demander d'interpréter son expérience dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière. C'est une démarche compréhensible, puisque Arago sait que, d'une part, Fresnel s'est déjà intéressé au problème de l'aberration, et que d'autre part, au même moment, il fait adopter la théorie ondulatoire par la communauté scientifique grâce à son "Mémoire couronné sur la diffraction" (1818).

Reprenant ses travaux, Fresnel, pour interpréter à la fois l'expérience de réfraction d'Arago et le phénomène d'aberration des étoiles dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière, cherche à montrer que, moyennant certaines hypothèses sur le milieu de propagation des ondes lumineuses, les deux phénomènes produisent des effets qui se compensent et qu'on peut ainsi expliquer le résultat négatif des expériences d'Arago. Dans un premier temps, il détermine la variation de déviation des rayons réfractés par le prisme quand ce dernier est en mouvement avec la Terre. Dans un second temps, il fait l'hypothèse d'un entraînement partiel de l'éther par les corps en mouvement<sup>3</sup>, et peut alors déterminer les effets de cet entraînement sur le phénomène d'aberration des étoiles. Il affirme ensuite, sans vraiment donner de démonstration rigoureuse, avoir trouvé des résultats identiques, au signe près, et en conclut alors qu'on peut finalement expliquer l'absence d'influence sensible du mouvement terrestre sur la réfraction.

Fresnel peut ainsi rendre compte du phénomène d'aberration des étoiles et donner une réponse à l'expérience d'Arago sur la réfraction de la lumière issue de diverses étoiles.

Fresnel semble donc être parvenu à ses fins, mais c'est au prix de grosses difficultés. Il est en effet amené à faire des hypothèses très discutables sur la nature du milieu, l'éther. À partir de ce moment, ces incertitudes quant au milieu vont être la principale préoccupation en optique. La science se trouve en panne conceptuelle. Il n'existe pas de concept d'éther permettant d'interpréter simplement l'ensemble des phénomènes lumineux. C'est d'autant plus important que cela concerne de nombreux phénomènes ; Fresnel travaille ainsi sur la double réfraction et la polarisation de la lumière depuis plusieurs années, et des notes manuscrites nous montrent qu'il a acquis la certitude que les vibrations de la lumière ne sont pas longitudinales, comme le pensait Huygens, mais transversales. Mais il ne peut l'affirmer haut et fort, car il ne peut proposer de support à la propagation de ces ondes transversales. Nous voyons donc se déplacer les centres d'intérêt. Le phénomène d'aberration lui-même n'est plus étudié pendant deux décennies, car il manque à l'optique une théorie de l'éther.

Fresnel trace les grandes lignes de la structure du milieu qui, pour que puissent se propager des vibrations transversales, doit être à la fois caractérisé par une discontinuité et une rigidité, et donne les lois régissant la répartition et le mouvement des "molécules éthérées" constituant ce milieu. Pour justifier son hypothèse de vibrations transversales, il est amené à changer de type d'analogie : il abandonne l'analogie sonore, utilisée jusqu'alors et conduisant à dire que la lumière est une onde longitudinale, et lui substitue l'analogie avec une corde vibrante. L'éther est devenu, non sans mal d'ailleurs, un solide élastique : il tient à la fois, et c'est paradoxal, du solide et du fluide.

Cette théorie est âprement discutée et contestée. En fait, pour que ce concept d'éther soit accepté, il faut qu'il puisse s'intégrer dans le cadre d'une théorie mécanique fondée sur des concepts mathématiques rigoureux. C'est là-dessus que vont travailler plusieurs savants à la suite de Fresnel, tels Cauchy ou Green. Ces propositions seront discutées, et même contestées, bien après la mort de Fresnel, notamment par Stokes, Maxwell, Lorentz, puis Einstein qui décidera que l'« éther est superflu ». Cependant, à partir du début du 19<sup>e</sup> siècle, grâce à Fresnel, le concept d'onde lumineuse est définitivement adopté. Fizeau, au milieu du même siècle, montrera que si l'éther existe, alors il est bien entraîné partiellement comme prévu et que la formule proposée intuitivement par Fresnel est exacte.

### **5. Conclusion**

Au travers de l'étude du phénomène d'aberration, il a été vu que la théorie corpusculaire de la lumière pouvait contribuer à rendre compte du phénomène étudié d'une façon relativement simple. Mais, certaines limites de cette théorie ont été atteintes lorsque la question de la constance de l'angle d'aberration a été examinée. C'est notamment pour dépasser ces limites que la théorie ondulatoire de la lumière a été introduite. On voit donc bien, au travers de cette étude de cas, la nécessité d'introduire cette théorie. Celle-ci permet d'expliquer de nombreux phénomènes optiques et de lever d'autres contradictions de la théorie corpusculaire de la lumière comme celle de l'indépendance des rayons lumineux. En effet, comment expliquer, par exemple, que deux rayons lumineux peuvent se croiser sans être déviés s'ils sont constitués de corpuscules lumineux ?

## **V. Comparaison des raisonnements utilisés par les élèves aujourd'hui et de ceux utilisés par les scientifiques autrefois**

Concluons cet exposé en soulignant les ressemblances et différences entre les raisonnements utilisés par les élèves et étudiants aujourd'hui et ceux utilisés par certains scientifiques dans la période classique.

Dans les deux cas, on observe des tendances vers des raisonnements mécanistes. Si la démarche des scientifiques est raisonnée, celle des étudiants ne l'est pas. Si les raisonnements des scientifiques s'appuient sur le cadre théorique de leur époque (la mécanique newtonienne), ceux des élèves relèvent d'une mécanique "spontanée".

Deux visions mécanistes de l'onde, liées à la nécessité ou non d'un milieu matériel, se retrouvent dans les raisonnements des élèves et des scientifiques :

– dans l'une, la propagation d'une onde dans le vide est possible, une onde correspondant à un déplacement de particules matérielles. Cette vision a été illustrée ici par Gassendi pour le son et par Newton pour la lumière.

– dans une autre, la propagation d'une onde nécessite un milieu matériel, celui-ci bougeant à grande échelle. L'onde correspond alors à un "vent" ou à un "courant". C'est la vision d'Aristote dans le cas du son et de Grimaldi dans le cas de la lumière.

Une vision ondulatoire matérielle de l'onde, dans laquelle le milieu matériel bouge à petite échelle, se rencontre également dans les deux raisonnements. Pour les scientifiques, tel Newton, il y a interaction entre éléments matériels voisins, alors que pour les élèves, il n'y en a pas. La grande question qui interpella les scientifiques était de savoir si la dynamique à laquelle obéit la propagation est identique ou non à celle de l'objet matériel en mouvement. Les élèves utilisent une dynamique "spontanée" de l'objet : l'onde correspond au déplacement d'un "capital".

## VI. Bibliographie

### A. Didactique

- [1] AGABRA, J. *Les échanges thermiques*, in Aster, éditions INRP, 1986, n°2, pp.1-42.
- [2] Aster. *Didactique et histoire des sciences*, éditions INRP, 1986, n°5.
- [3] ASTOLFI, J.P. et PETERFALVI, B. *Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales*, in Aster, éditions INRP, 1993, n°16, pp.100-110.
- [4] BALLINI, P. et ROBARDET, G. et ROLANDO, J.M. *L'intuition, obstacle à l'acquisition de concepts scientifiques : propositions pour l'enseignement du concept d'énergie en première S*, in Aster, éditions INRP, 1997, n°24, pp.81-112.
- [5] BENSEGHIR A. *Transition électrostatique-électrocinétique ; point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*. Thèse, Université Paris 7, 1989.
- [6] FAWAZ, A. et VIENNOT, L. *Image optique et vision*, in B.U.P., 1986, n°686, pp.1125-1146.
- [7] GALILI, I. *Students' conceptual change in geometrical optics*, in *Int.J.Sci.Educ*, 1996, vol.18, n°7, pp.847-868.
- [8] GALILI, I. et HAZAN, A. *The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis*, on web : <http://www.ppm.ipn.unikiel.de/ipn/projekte/esera/book/eserbook.htm>, 1999.
- [9] GUILBERT, L. et MÉLOCHE, D. *L'idée de science chez les enseignants en formation : un lien entre l'histoire des sciences et l'hétérogénéité des visions ?*, in *Didaskalia*, éditions DeBoeck, 1993, n°2, pp.23-46.
- [10] HALBWACHS, F. *La pensée physique chez l'enfant et le savant*, éditions Delachaux et Niestlé, 1974.
- [11] JOHSUA, S. *Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire*, in Aster, éditions INRP, 1989, n°8, pp.29-54.
- [12] KAMINSKY, W. *Conceptions des enfants et des autres sur la lumière*, in B.U.P., 1989, n°716, pp.973-996.
- [13] LEFÈVRE, R. *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique*. Thèse, Université Paris 7, 1988.
- [14] MARTINAND, J.L. *Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ?* in *Didaskalia*, éditions de Boeck, 1993, n°2, pp.89-99.
- [15] MAURINES, L. et SALTIEL, E. *Mécanique spontanée du signal*, in B.U.P., 1988, n°707, pp.1023-1041.
- [16] MAURINES, L. *Raisonnement commun à propos du son*, in L.Viennot, *Raisonnement en physique*, éditions De Boeck, 1996, pp.157-167.
- [17] MAURINES, L. *Les élèves et la propagation des signaux sonores*, in B.U.P., 1998, n°800, pp.1-22.
- [18] MAURINES, L. *Le raisonnement géométrique en terme d'objet dans la physique des ondes*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 11, 2001.
- [19] PIAGET, J. et GARCIA R. *Psychogénèse et histoire des sciences*, éditions Flammarion, 1983.
- [20] RESNICK, L. *Convictions ontologiques dans l'apprentissage de la physique*, in N Bednarz et C. Garnier, *Construction des savoir, Obstacles et conflits*, éditions CIRADE, Agence d'ARC inc, Ottawa, 1989, pp.103-119.
- [21] SALTIEL, E. *Qu'apprend-on d'une comparaison entre raisonnements spontanés des élèves et modèles physiques anciens ?*, in *Actos do i encontro sobre educaçao em ciencias Brag*, éditions M. Sequeira, L. Leite et M. Freitas, 1987, pp.145-161.
- [22] SALTIEL, E. et MALGRANGE, J.L. *Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire*, in B.U.P., 1979, n°616, pp.1325-1342.
- [23] SALTIEL, E. et VIENNOT L. *What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ?*, in P. Linjse (Ed.), *The many faces of teaching and learning mechanics*. Utrecht, éditions GIREP/SVO/UNESCO, 1984.
- [24] TOUSSAINT, J. et GRÉA, J. *Construire des concepts et mettre en œuvre des raisonnements, ce que peut apporter un regard sur l'histoire des sciences*, in J. Toussaint (coord), *Didactique appliquée de la physique-chimie*, éditions Nathan, 1996, pp.86-118.
- [25] VIENNOT, L. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, éditions Hermann, 1979.
- [26] VIENNOT, L. *Raisonnement en physique*, éditions De Boeck, 1996.

## B. Historique

- [27] ACLOQUE P., *Cahier d'histoire et de philosophie des sciences*, N°4, "Histoire des expériences pour la mise en évidence du mouvement de la terre" : "Les expériences d'optique. Expérience sans repère extérieur.", 73-89, "Expériences sur la chute des corps.", 15-35, Paris, (1982). N°36, « L'aberration stellaire », Paris, 1991.
- [28] AUDIGIER, Fillon, *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques*, Paris, INRP, 1991.
- [29] BACHELARD, G. *La formation de l'esprit scientifique*, éditions Vrin, 1938.
- [30] BALIBAR F., *Einstein 1905, de l'éther aux quanta*, Paris, PUF, coll. Philosophies, 1992.
- [31] BALIBAR F., *Galilée, Newton lus par Einstein*, Paris, PUF, coll. Philosophies, 1994.
- [32] BLAY, M. *La conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur, "L'œuvre créatrice de Newton"*, 79-113, Paris (1983).
- [33] BLAY, M., *Lumières sur les couleurs*, Ellipse, Paris, 2001.
- [34] DAUMAS M., *Histoire de la science*, ed. La Pléiade, Paris, 1963.
- [35] A. EINSTEIN, L. INFELD, *L'évolution des idées en physique*, (1936 rééd. Paris, Flammarion 1982).
- [36] FEYERABEND, *Contre la méthode : esquisse d'une théorie anarchique de la connaissance*, Paris, Seuil, 1988.
- [37] KUHN (Thomas), *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Champs Flammarion, 1983 (1ère ed. anglaise en 1962), au moins l'introduction et les chapitres 3 à 8.
- [38] LINDSAY, R.B. *Acoustics : historical and philosophical development*, éditions Dowden Hutchinson and Ross Inc., 1972.
- [39] MAITTE B., *La lumière*, Paris, (1981).
- [40] MAYRARGUE A., *Fresnel et l'éther optique*, La Recherche n° 218, février 1990.
- [41] MAYRARGUE A., *Physique Technologie*, Bordas, 2001.
- [42] NEWTON I., *Optique*, (1722) (Paris, rééd. Bourgeois, 1989).
- [43] POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1968.
- [44] RONCHI, V. *Histoire de la lumière*, éditions Colin, 1956.
- [45] ROSMORDUC J., *Une histoire de la physique et de la chimie*, Paris, Seuil, 1983.
- [46] Les cahiers Clairaut, publiés par le CLEA (Université Paris-Sud).
- [47] Revue d'Histoire des Sciences, dirigée par Michel BLAY.
- [48] *Aster*, Revue de didactique des sciences expérimentales, INRP, N°5, 1987, *Didactique et histoire des sciences*.

---

<sup>1</sup>Ce point est souligné dans la pochette de séance manuscrite que nous avons consultée, et non dans le procès-verbal de séance. Arago, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, « Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut le 10 décembre 1810, T. 36, 38-49, Paris, 1853, p. 38.

<sup>2</sup> C'est la première expérience par rapport au mouvement absolu de la Terre. Cette expérience constitue donc le premier pas vers la relativité restreinte. Elle montre l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. C'est une question essentielle, reprise plus tard par Michelson, puis par Einstein qui conclura à l'impossibilité, "par des expériences de physique faites à l'intérieur d'un système de mettre en évidence le mouvement rectiligne et uniforme de l'ensemble de ce système."

<sup>3</sup> Grâce à cette hypothèse, Fresnel peut calculer le coefficient d'entraînement de l'éther. C'est un résultat essentiel, puisque cette formule est l'un des points de départ de ce qu'on appellera plus tard la relativité restreinte.