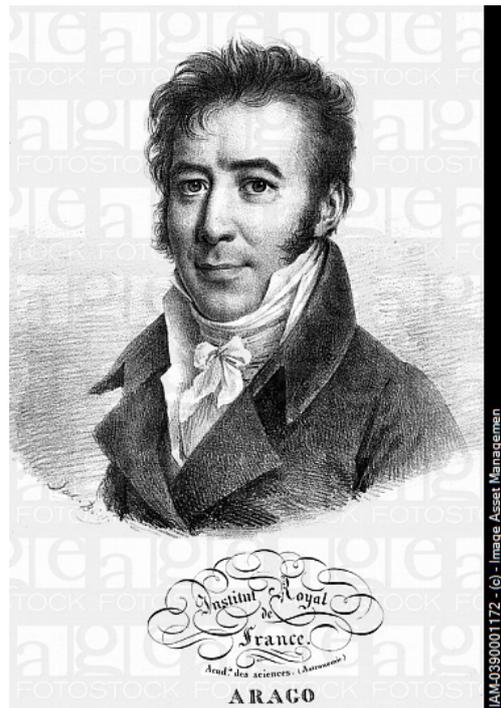


# Les Découvertes

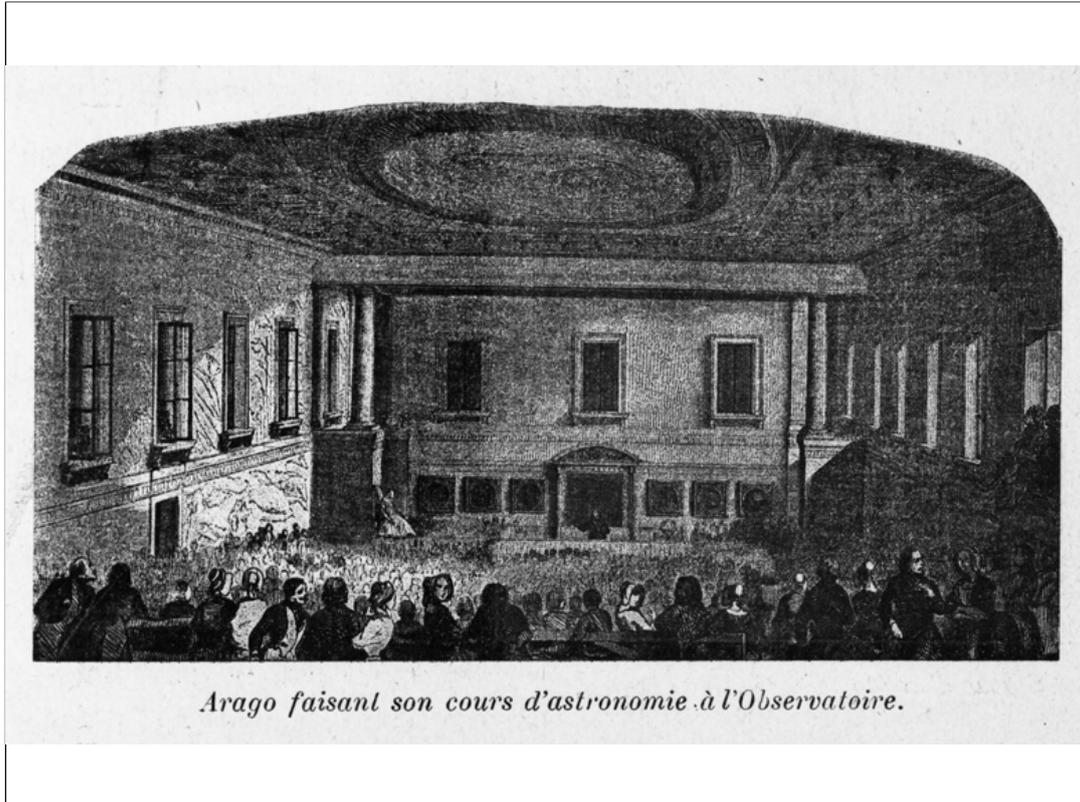


Portrait officiel d'Arago pour l'Institut de France peint par Boilly. C'est le plus vieux portrait d'Arago.

<http://www.agefotostock.com/en/Stock-Images/Rights-Managed/IAM-0390001172>

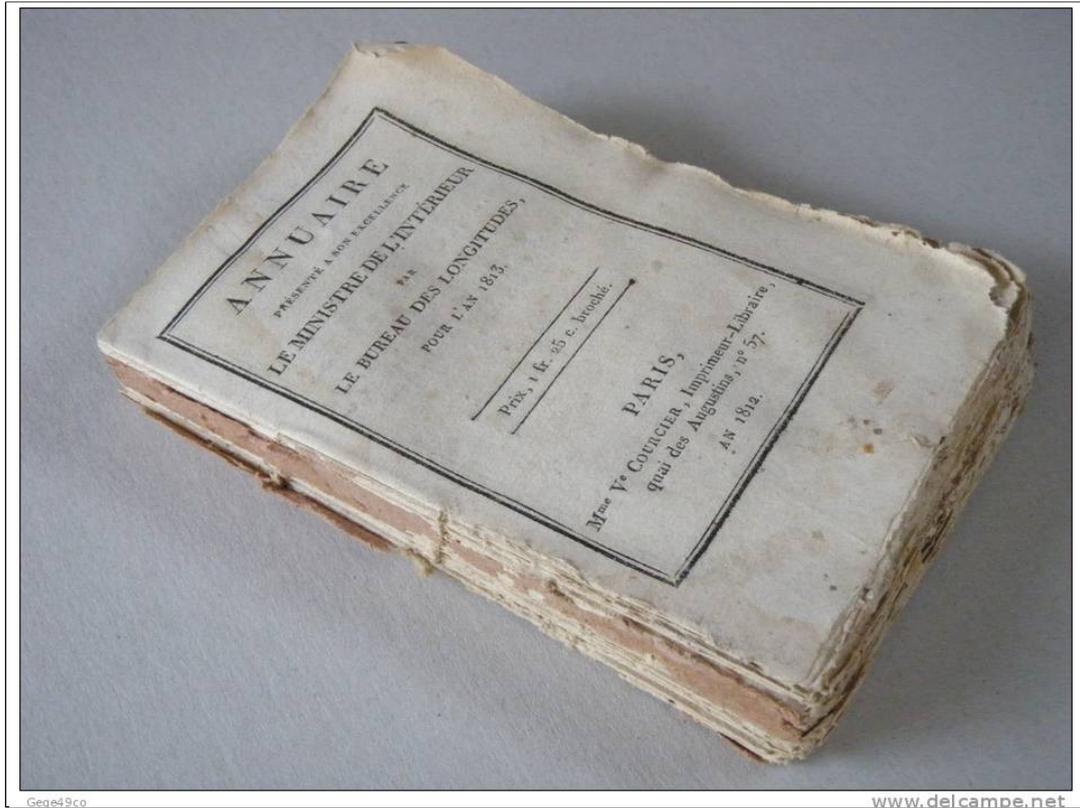
# **Le jeune savant à la tâche**

La faveur dans une société est un phénomène instable, il suffit qu'il y en ait un peu pour que tout s'enchaîne. Après la nomination d'Arago à l'Institut, Monge lui proposa d'assurer ses cours à L'École Polytechnique. C'est ainsi que l'astronome Arago devint professeur de géométrie descriptive.



Cours d'Arago à l'Observatoire de Paris vers 1840  
<http://www.obspm.fr/IMG/jpg/0002426-amphi1.jpg>

De plus, en 1812 le BdL le chargea d'une nouvelle tâche, assurer le cours d'astronomie publique, nécessité statutaire de cet organisme. Cette fonction ne lui déplut pas, elle lui fut l'occasion de faire le point sur les différentes questions concernant l'Astronomie et de transmettre cela au public. Celui-ci n'était initialement que des futurs marins, cartographes ou des astronomes de province. Mais Arago transforma ce cours en véritable cours d'Astronomie Populaire, et on peut s'étonner aujourd'hui de lire que plusieurs centaines de personnes de tout milieu venaient écouter le maître. C'était un orateur remarquable. Bel homme, très grand pour son époque (1m86), disposant d'une voix forte et mélodieuse, il arrivait facilement à capter l'attention de son public.



### Annuaire du Bureau des longitudes 1812

[http://images-01.delcampe-static.net/img\\_large/auction/000/175/310/067\\_001.jpg](http://images-01.delcampe-static.net/img_large/auction/000/175/310/067_001.jpg)

Le BdL publiait chaque année un annuaire, contenant diverses informations scientifiques et techniques utiles. Arago prit l'initiative d'ajouter un mémoire sur un sujet relatif à l'astronomie, la météorologie, la physique, la physique du globe, etc. Grâce à son talent immense de vulgarisateur, ces notices étaient très accessibles au public et les lecteurs se passionnaient pour leur lecture.



Louis Joseph GAY-LUSSAC (1778-1850)

<http://www.sabix.org/bulletin/b5/gay-lussac.html>

L'ensemble Humboldt, Gay-Lussac, Arago formait un trio d'amis. Ils s'installèrent ensemble près de la barrière d'Enfer, partageant leur repas, discutant des expériences anciennes ou à venir. Avec Gay-Lussac, Arago décida en 1811 de rééditer les *Annales de Chimie et Physique* qui avaient été arrêtées pendant les heures sombres de la Révolution. Ceci ne fut pas tout à fait du goût de Laplace qui diffusait ses *Annales de la Société d'Arcueil*, mais l'initiative d'Arago et de Gay-Lussac fut très appréciée des autres savants français qui ne souhaitaient pas toujours passer par l'avis de Laplace ou de Berthollet. Ces annales firent suite aux *Annales de Chimie* qu'éditaient déjà Gay-Lussac. L'extension à la Physique ne se fit pas sans difficulté.

## Visite à l'Observatoire de Paris



Frédéric-Guillaume III de Prusse

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9d%C3%A9ric-Guillaume\\_III\\_de\\_Prusse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9d%C3%A9ric-Guillaume_III_de_Prusse)

En 1814, le Roi Louis XVIII s'installa à Paris. Avec ce premier retour de la royauté, peu de bouleversements eurent lieu dans la vie d'Arago. Par contre, après les Cent-Jours, Paris fut occupé. Les cosaques pillèrent des imprimeries, détruisant en particulier le manuscrit du travail d'Arago sur la polarisation chromatique. Humboldt servit parfois d'intermédiaire entre les savants français et l'occupant. Arago fut hostile aux armées d'occupation. Humboldt dut utiliser un stratagème pour faire visiter l'Observatoire au Roi de Prusse, Frédéric-Guillaume III. La veille de son départ pour Berlin, Humboldt vint serrer la main d'Arago, avec un compagnon désireux de voir les instruments et les cabinets d'observation. Pendant la visite Arago indiqua son indignation sur la façon dont les princes coalisés faisaient payer à la France l'aventure d'un homme. Humboldt lui demanda de se modérer, c'était le roi. Arago lui répliqua : « *Je m'en doutais bien, c'est pour cela que j'ai exprimé si nettement mon opinion.* »

Progressivement un nouvel ordre fut établi. La promotion 1814 de L'École Polytechnique, impliquée dans la dernière aventure de Napoléon, fut dissoute. L'Institut fut renouvelé en 1816. Arago, considéré comme favorable au précédent régime, conserva néanmoins son siège. Il fut toutefois rayé de l'ordre de la légion d'honneur. Il conserva ses différentes fonctions, pouvant poursuivre ses enseignements et ses recherches dans d'assez bonnes conditions.

# La Famille Arago



Emmanuel Arago

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Emmanuel\\_Arago](http://fr.wikipedia.org/wiki/Emmanuel_Arago)

Arago se maria avec Lucie Carrier-Desombes le 11 Septembre 1811. Le couple s'installa à l'observatoire de Paris, où il y resta jusqu'à la mort d'Arago en 1853. On sait très peu de chose sur sa femme Lucie. Dans quelques rares lettres, Humboldt en parla en termes chaleureux, mais on ne dispose de détails sur ni ses actions, ni sur sa famille. Arago eut trois fils avec elle, Emmanuel, Alfred et Gabriel. Aucun d'entre eux ne fut astronome ni savant. Emmanuel entra très tôt dans le corps diplomatique, Alfred devint avocat et Gabriel mourut très jeune.



Marie Roig (1755-1845), épouse Arago, mère de François Arago par Pierre-Jean David d'Angers (médaille, 1843)

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marie\\_Arago\\_by\\_David\\_d%27Angers.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marie_Arago_by_David_d%27Angers.png)

A Perpignan, François-Bonaventure mourut en 1814. Son fils Jean prit sa succession comme caissier de la monnaie. À la Restauration, il dut céder la place. Il se retira à Estagel, mais la petite propriété familiale était trop petite pour satisfaire les besoins de l'ensemble de la famille. Lucie Laugier, fille de Marguerite, nota plus tard : « *Désolé, indigné, dégoûté de ce qui se passait en France, Jean réunit ses dernières ressources et partit pour le Mexique ; il devint le bras droit de Santa Anna, de Bustamade, fit avec eux la guerre d'indépendance, devint un officier distingué, brillant, et en peu d'années obtint le grade de général en chef. Il fonda L'École Polytechnique ; son rare métier, son intégrité absolue lui firent confier les positions les plus enviées. Il dirigea les mines du Mexique et ne mena jamais que la vie modeste et simple d'un officier sans fortune personnelle. Il était adoré, vénéré et on lui offrit à deux reprises la Présidence de la république mexicaine qu'il refusa toujours, disant que malgré sa naturalisation il ne voulait pas occuper cette haute fonction réservée à un Mexicain.* » Jean Arago mourut en 1836 lors de la guerre du Texas.



Jacques Arago (1790-1854)

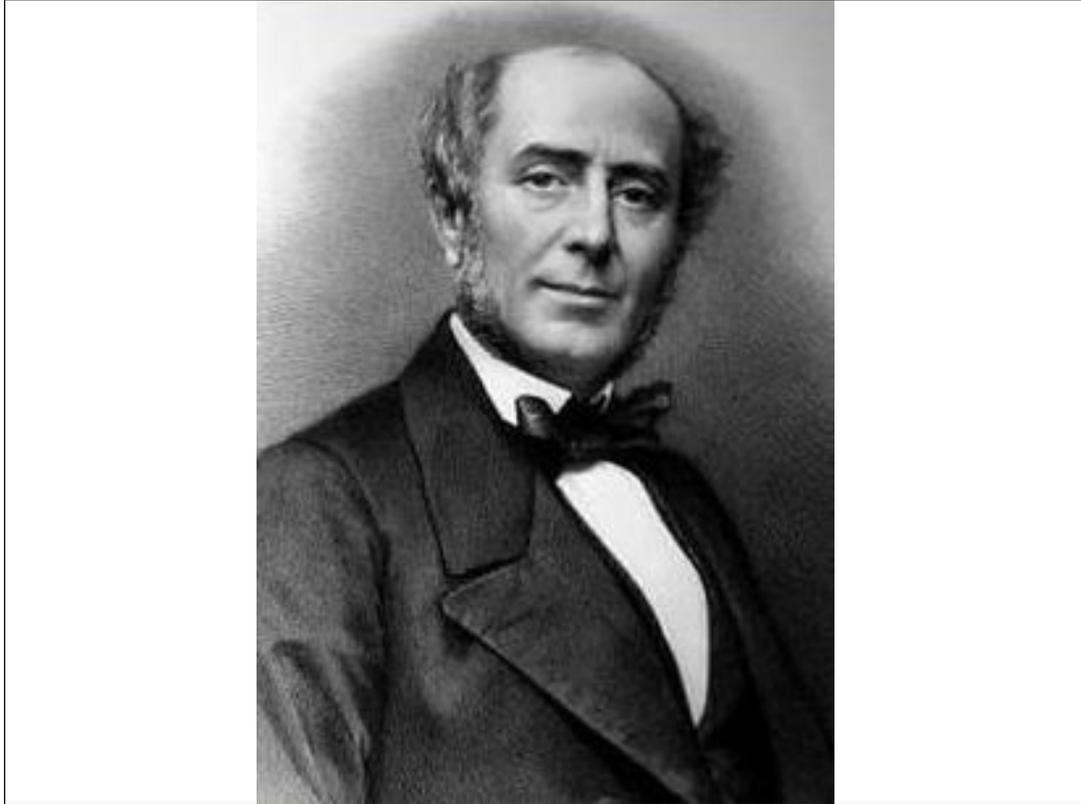
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Jacques\\_Arago](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jacques_Arago)

Rose a épousé un veuf avec quatre enfants, et avec lequel elle eut elle-même cinq enfants. Elle se retrouva veuve en 1828 avec neuf enfants à sa charge.

Jacques était un écrivain et dessinateur talentueux. Avec l'appui de François, il embarqua pour faire le tour du monde comme dessinateur dans un vaisseau. Il mena une vie désordonnée qui fera la désolation de la famille.

Victor entra à L'École Polytechnique en 1810, mais il n'y passa qu'une année, participant aux derniers combats napoléoniens. Il subit la Restauration comme tous les officiers de la Grande Armée.

Joseph s'était engagé comme cuirassier. Jean lui décrit dans ses lettres les combats de la Guerre d'indépendance mexicaine. Joseph le rejoignit et eut là-bas une belle carrière militaire.



Etienne Arago

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne\\_Arago](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne_Arago)

Marguerite était née en 1798, elle fut appelée en 1820 par François, pour lui faire visiter la capitale. Elle y rencontra l'astronome Louis Mathieu, qu'elle épousa peu après. Elle soigna la femme de son frère, Lucie, atteinte de la phtisie qui l'emporta au tombeau. Marguerite devint une nouvelle mère pour les enfants de son frère François.

Etienne, né en 1802, subit le retournement de fortune de la famille à la Restauration. Il monta à Paris à l'appel de son frère, malgré le déplaisir de sa femme Lucie qui désavouait les sacrifices effectués pour la famille. Après diverses pérégrinations, Etienne se lance dans la littérature avec des inconnus de l'époque, Honoré de Balzac, puis Alexandre de Dumas. Il prend en charge le théâtre du Vaudeville.

Il est difficile de suivre la logique chronologique pour analyser l'activité de François Arago au cours de ses quarante années de carrière. Ses travaux se sont poursuivis parallèlement sur de longues périodes, et un récit continu fatiguerait très vite le lecteur. Le découpage en thèmes a l'avantage de montrer la cohérence du savant et d'en faire ressortir l'originalité.

# L'Opticien

## La Réfraction des Gaz

Nous avons vu qu'avant de partir pour la Catalogne, Arago avait étudié avec Biot la réfraction des gaz. À son retour d'Afrique, il reprit ce travail avec le physicien, et beau-frère, Alexis Petit. Leurs expériences portèrent sur différents gaz, pouvant être facilement liquéfiés, ce qui permettait de déterminer les propriétés de ces corps dans les deux phases, liquide et gazeuse. Les deux physiciens montrèrent que la réfringence ne correspondait pas à ce qu'on attendait avec la théorie de Newton. En tenant compte des densités relatives dans les deux phases, la réfringence dans la phase liquide était bien plus grande que dans celle gazeuse. Cette mise en cause de la théorie de Newton, ne perturba pas trop Laplace, et les partisans acharnés de Newton, tel le mathématicien Cauchy qui mis plus tard en cause les mesures sur la réfringence des gaz.

Une étude sur la réfraction de l'air avec la température et la pression conduisit à des tables dites d'Arago qui ont été souvent utilisées par les astronomes pour corriger la hauteur des étoiles de la réfraction.

Alexis Petit, polytechnicien de la promotion 1807, se distingua plus tard avec l'établissement d'une célèbre loi avec Dulong : « *La chaleur spécifique d'un solide est en général un nombre voisin de 6,4 par atome gramme.* » En épousant une sœur de l'astronome Mathieu il devint ainsi beau-frère d'Arago. Il mourut très jeune.



Cercle répétiteur utilisé par Arago pour son expérience

<http://www.cemhti.cnrs-orleans.fr/People/textes/Documents%20Yann%20Vails/Aux%20origines%20de%20l%20optique%20physique.pdf>

Nous avons vu qu'Arago avait soumis à l'Académie des Sciences un mémoire sur la mesure de l'effet du mouvement de l'observateur pour la vitesse de la lumière. Ce mémoire a été analysé pendant ses aventures par Delambre et Laplace. Pour P. Costabel c'est l'originalité de ce travail qui a poussé Lagrange à soutenir la candidature d'Arago à l'Institut. À son retour d'Afrique, Laplace lui demanda de procéder à l'expérience. Avec un premier prisme de  $6^\circ$ , aucune déviation ne fut observée. Arago passa à un prisme de  $11^\circ$ , et aucun déplacement n'était mesurable. L'expérience était donc négative. D'après ses calculs, et ceux de Laplace, la déviation devait être mesurable dans l'hypothèse de la théorie de Newton de la lumière. Laplace fut très perplexe devant ce résultat, qui conduisait à ne pas percevoir le mouvement de translation de la Terre sur son orbite par rapport aux étoiles. Une des explications avancées par Laplace résidait dans l'hypothèse que l'émission de grains par la source lumineuse s'effectuait à toutes les vitesses, mais que l'œil avait une sensibilité qu'aux grains ayant une vitesse donnée. Cette interprétation était bien curieuse.

# La constance de la vitesse de la lumière

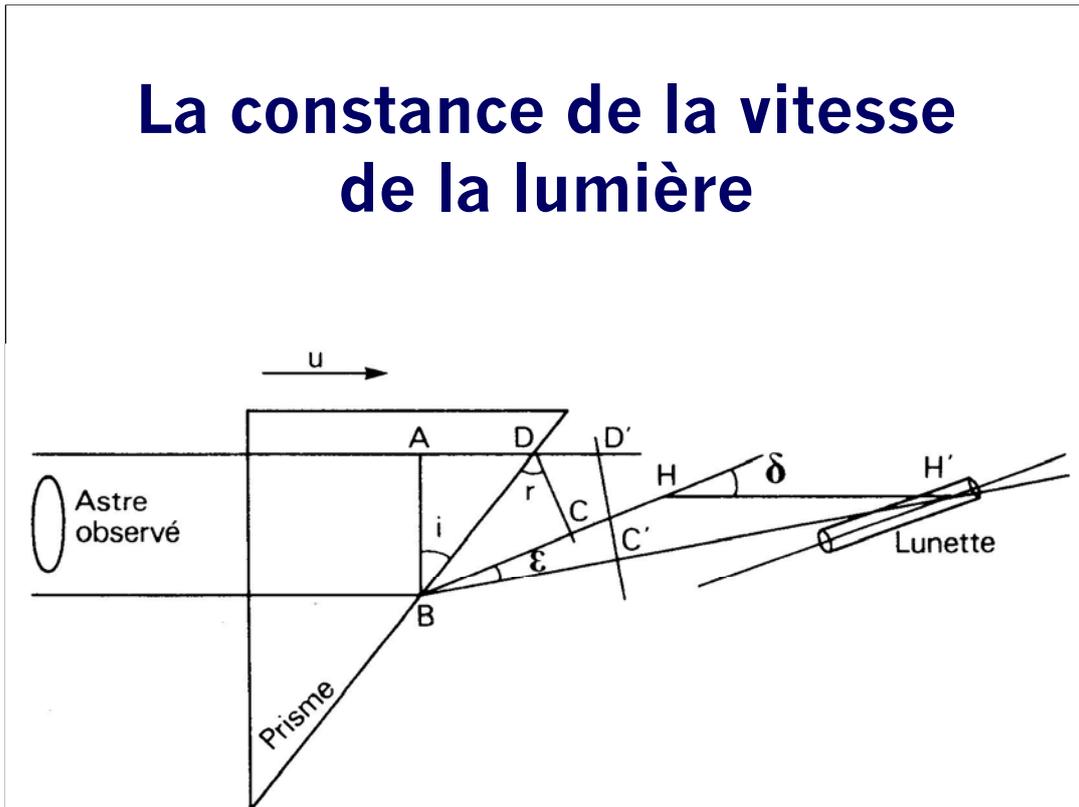


Schéma de l'expérience d'Arago par Fresnel d'après Costabel

Quelques années plus tard, en 1817, Arago demanda à Augustin Fresnel d'interpréter son expérience d'après la théorie ondulatoire. Ce savant lui démontra alors qu'aucun effet ne devrait être perceptible. En poussant plus loin son analyse, Fresnel expliqua qu'en fait dans un milieu réfringent il y a un *entraînement partiel de l'éther*, support des ondes lumineuses. Ce travail resta de côté, jusqu'au jour où Fizeau et Foucault mirent en œuvre les idées d'Arago pour mesurer la vitesse de la lumière. Arago expliqua à ses collaborateurs la thèse de Fresnel. Quelques temps après Fizeau confirma expérimentalement cette proposition d'entraînement de l'éther.

Avec l'expérience de Michelson, la théorie de l'entraînement de l'éther fut dépoussiérée à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Mais c'est Albert Einstein qui fournit, avec la théorie de la relativité le cadre actuel pour interpréter ce phénomène. François Arago fut donc le premier savant qui, à vingt ans, proposa la première expérience conduisant à mettre en cause la mécanique galiléenne.

# La polarisation chromatique & rotatoire



Biréfringence par un cristal de calcite

<http://www.cours.polymtl.ca/glq1100/mineraux/calcite/calcite.html>

Le phénomène de polarisation de la lumière est connu depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle. Lorsqu'on regarde à travers une lame de spath d'Islande, on voit deux images. Les physiciens avaient remarqué que cela correspondait à deux réfractions, l'ordinaire suivant la loi de Descartes, et une réfraction extraordinaire, dont ils avaient du mal à comprendre la nature, et pour laquelle on avait introduit un indice extraordinaire. C'était bien difficile d'expliquer cela avec la théorie de Newton, comment l'attraction de la matière pouvait avoir un comportement différent. On avait envisagé un système ressemblant à des aimants, ayant deux pôles, d'où l'expression de polarisation donnée au phénomène. À la fin du XVIII<sup>ème</sup> on ne connaissait que très peu de matériaux produisant cette réfraction, et les physiciens considéraient ce phénomène comme une simple curiosité, non représentative de l'ensemble des phénomènes de réfraction.

Mais un physicien français Etienne Louis Malus vint perturber ce schéma en découvrant la polarisation par réflexion. Ce polytechnicien de la première promotion observait la réflexion du Soleil sur une mare d'eau. Jouant avec un spath d'Islande, il s'aperçut que la lumière réfléchie pouvait être éteinte par une rotation spécifique du quartz, mais il n'en était rien pour la lumière directe du Soleil. Malus poursuivit ses recherches avec des miroirs et s'aperçut que les réflexions pouvaient permettre de supprimer la lumière. Il n'y avait plus de matériau curieux, tout se faisait par des réflexions sur des miroirs, conformément à la loi classique de Descartes. Il n'y avait pas d'indice extraordinaire, ce phénomène était incompréhensible dans le cadre la théorie des grains de lumière de Newton.

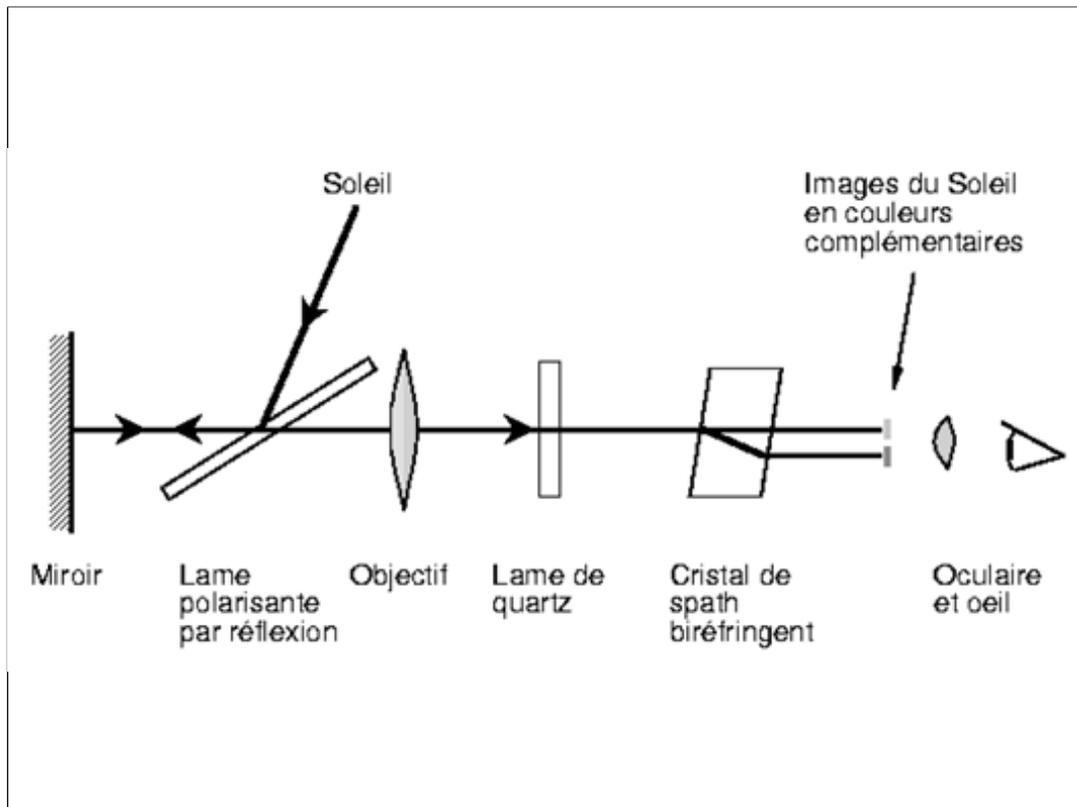


Etienne-Louis Malus (1775-1812)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne\\_Louis\\_Malus](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne_Louis_Malus)

Arago se lia d'amitié avec Malus et défendit ses travaux devant l'Académie. Un poste devenant vacant, il poussa Malus à s'y présenter et il le soutint victorieusement.

Les travaux de Malus inspirèrent Arago. En combinant une lame mince, initialement de mica, puis une lame en cristal de roche avec une lame d'un matériau biréfringent, typiquement du spath d'Islande. Arago découvre en 1811 la polarisation chromatique et la polarisation rotatoire. En examinant un objet à travers le dispositif, on le voit double, en raison du passage dans le cristal biréfringent. Si la lumière éclairante n'est pas polarisée, les deux images restent blanches quelle que soit la rotation de la lunette sur son axe. Avec une lumière polarisée, les deux images sont colorées, et de couleur complémentaire. Elles changent de couleur par rotation.



Montage d'Arago pour mettre en évidence la polarisation rotatoire chromatique (*polariscope*).

<http://expositions.obspm.fr/F.Arago/polarisat.pdf>

Un artisan parisien eut l'idée de construire un dispositif permettant de faire apparaître par ce moyen différents dessins. La dernière image fut le nom d'Arago, qui devint célèbre dans les rues de Paris. Arago pointa son *polariscope* dans de nombreuses directions, l'atmosphère, le Soleil, la Lune, etc. Ce qui lui permit de faire des découvertes importantes que nous examinerons ultérieurement.

# La vérification de la loi de Malus

Cette découverte fut l'occasion d'un premier conflit avec Biot. Celui-ci entreprit d'étudier selon sa méthode la polarisation chromatique et rotatoire, ce qui mit Arago dans une vive colère, estimant déloyale cette intrusion dans ce qu'il appela son domaine. La publication des résultats obtenus sur la réfraction des gaz et celle sur l'extension de la Méridienne lui avaient ouvert les yeux sur les problèmes de paternité des résultats scientifiques. Cette affaire de la polarisation le conduisit à être encore plus prudent, faisant contresigner ses cahiers de travail par un autre astronome, afin de pouvoir conserver la paternité de ses travaux. Et il eut l'occasion de se servir de cette sauvegarde par la suite.

Malus avait proposé une loi dite en cosinus carré pour le rapport relatif des rayons ordinaire et extraordinaire. Cette loi sera ultérieurement démontrée par Fresnel dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière. Arago l'a vérifiée expérimentalement avec un montage très original, se basant sur la polarisation chromatique et rotatoire.

Cette démonstration lui était indispensable pour asseoir ses travaux de photométrie.

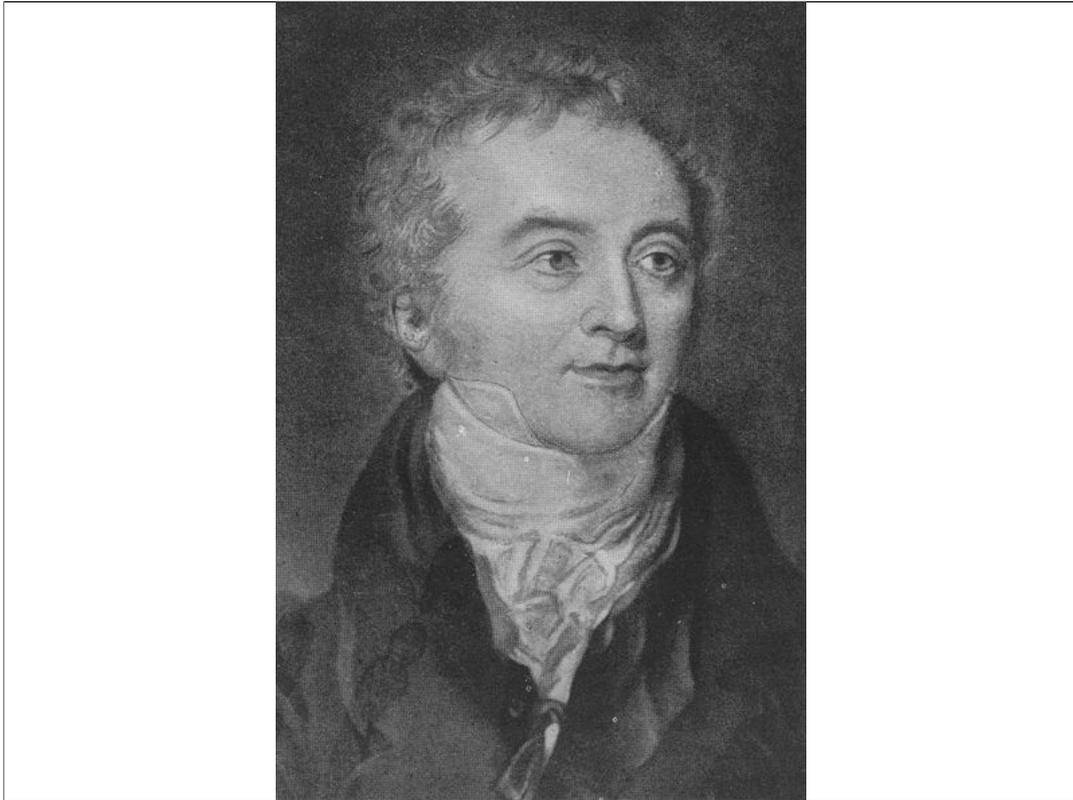
# L'interférométrie & la nature de la lumière



Augustin Fresnel (1788-1827)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Augustin\\_Fresnel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Augustin_Fresnel)

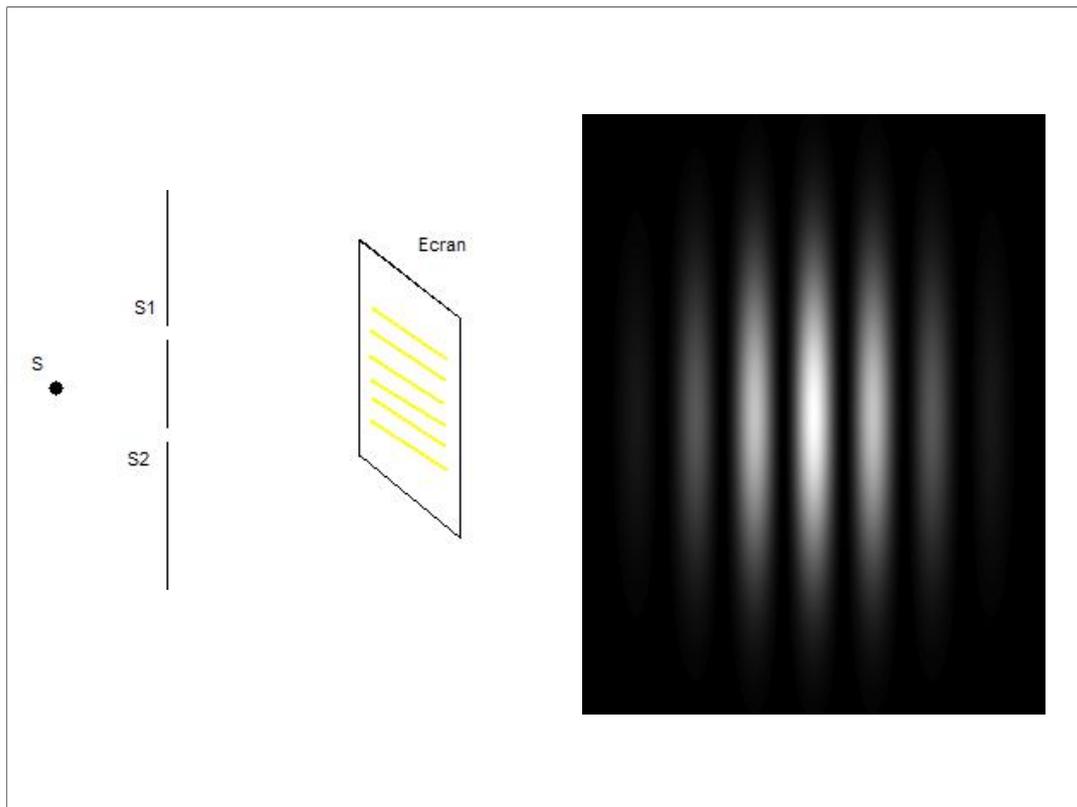
Ayant acquis une grande renommée comme opticien, Arago fut sollicité en 1814 par un jeune ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien élève de L'École Polytechnique Augustin Fresnel. Celui-ci lui envoya d'abord un mémoire sur l'interprétation de l'aberration annuelle des étoiles. En réponse, Arago lui indiqua que son mémoire était intéressant mais que l'astronome anglais Bradley avait fourni quelques décennies plus tôt cette interprétation. Fresnel lui récrivit en lui décrivant une expérience d'interférométrie qu'il avait réalisée. Arago répondit qu'également cette expérience avait été déjà faite par l'anglais Thomas Young, mais que son mémoire comportait quelques remarques intéressantes et qu'il le présenterait à l'Académie des Sciences.



Thomas Young (1729-1829)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Young](http://fr.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young)

Newton avait lui-même découvert le phénomène d'interférence sur des lames minces, les fameux anneaux de Newton qu'il est aisé d'observer en travaux pratiques d'optique. C'était le grain de sable dans sa théorie de la lumière, et il n'arrivait pas à l'expliquer dans ce cadre. C'est Young qui réalisa en 1807 la première expérience d'interférences élémentaire. On perce dans une tôle deux petits trous très proches l'un de l'autre et on éclaire le tout avec une lumière assez monochromatique. On place un écran à quelques centimètres des trous et on observe dans la zone éclairée par les deux trous non pas une lunule deux fois plus éclairée, mais une alternance de petits traits lumineux, appelés franges. La lumière ne s'additionne pas normalement, mais selon la position l'intensité est plus élevée que dans la somme ou au contraire nulle, on constate ainsi de la lumière sur de la lumière peut donner du noir. Il semble que ce phénomène avait été aperçu par l'italien Grimaldi au XVIII<sup>ème</sup> siècle.

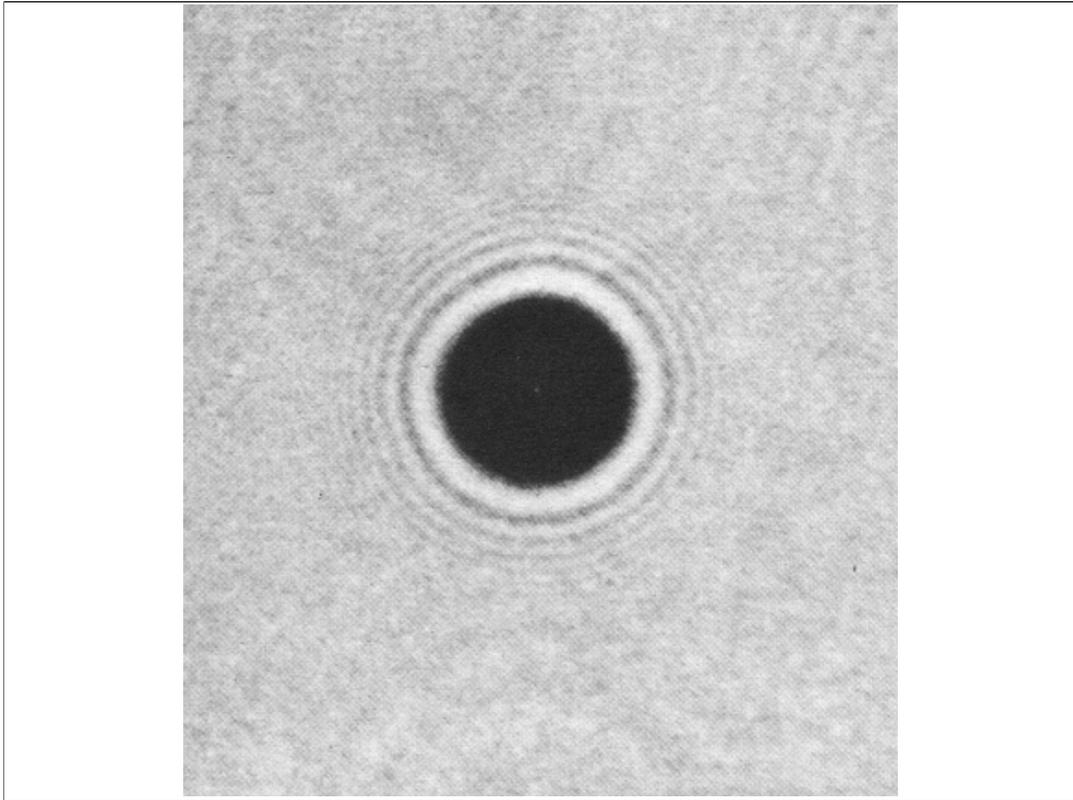


### Interférences avec des fentes d'Young

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fentes\\_de\\_Young](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fentes_de_Young)

Thomas Young comprit que cette expérience confirmait la nature ondulatoire de la lumière, prônée par le hollandais Christian Huyghens, qui s'opposait ainsi à la thèse de Newton. Mais le succès de la gravitation universelle avait été tel qu'il n'était pas pensable que le grand Newton ait pu se tromper, et la théorie de Huyghens avait été rejetée malgré sa capacité à expliquer simplement la réfraction par un principe de moindre action, en accord avec la théorie de Lagrange de Mécanique analytique. La théorie ondulatoire expliquait parfaitement les anneaux de Newton, mais aussi les franges d'interférence observées. Young pensa que la lumière était une onde longitudinale, comme le son et défendit cette idée contre les farouches défenseurs de la thèse de Newton. Par ailleurs Thomas Young fut un personnage exceptionnel de la science. Très érudit, il s'était intéressé à de nombreux problèmes, dont celui du décodage des hiéroglyphes. Il ne fut pas très loin de percer leurs mystères avant Champollion.

Peu de temps après publication de l'article de Fresnel sur les phénomènes d'interférences, en 1816 Arago alla en Angleterre avec Humboldt pour réaliser le raccordement des mesures géodésiques entre les astronomes français et anglais. Ils allèrent voir Young, qui les reçut assez froidement. En fin de repas, Mme Young disparut laissant les visiteurs un peu pantois. Elle revint avec un cahier où son mari avait noté les faits indiqués par Fresnel, laissant entendre qu'Arago, éditeur de la revue, n'aurait pas dû publier cet article. Malgré ce petit incident, Arago et Young devinrent de très grands amis.



Tache de Poisson due à la diffraction de Fresnel

Fresnel et Arago collaborèrent pour approfondir les phénomènes interférentiels. Fresnel développa le modèle mathématique. Les expériences ne furent pour lui qu'un moyen de confirmer ses idées. Il n'avait plus d'emploi, ayant démissionné de son poste d'ingénieur des Ponts et Chaussées pour poursuivre ses recherches. Arago l'aida à obtenir des moyens pour poursuivre dans de bonnes conditions ses travaux. Il proposa qu'il y ait un prix de l'Académie des Sciences pour la meilleure expérience concernant les théories de la lumière. Fresnel remporta ce prix, avec sa fameuse expérience de la diffraction à distance finie, appelée toujours diffraction de Fresnel. En éclairant un petit disque opaque en lumière parallèle monochromatique des anneaux concentriques noirs et lumineux sont observés sur un écran situé à faible distance. Evidemment la théorie des grains ne pouvait expliquer cela facilement, alors que Fresnel en donna une explication lumineuse avec la théorie ondulatoire. Laplace resta sceptique, Biot ne voulut pas fâcher son maître et resta convaincu de la théorie de Newton. Par contre Poisson, que Laplace considérait comme son successeur spirituel, fut frappé par cette expérience. S'enfermant quelques temps dans des calculs délicats il montra qu'au centre du disque une tache blanche devait être visible, ce que l'expérience montra. Néanmoins, Poisson ne rejoignit pas le clan des partisans de la théorie ondulatoire.

Par dualité, on montra que si un trou est éclairé en lumière parallèle monochromatique une tache noire est observée au centre. Ce fait, vérifié expérimentalement, est appelé par certains *tache noire d'Arago*. Mais je n'ai pas trouvé dans les œuvres d'Arago un détail permettant de confirmer cette paternité.

# Expériences d'interférométrie

**Expérience avec une lame mince**

**Expérience en lumière polarisée**

Arago montra ensuite un résultat étonnant : si une lame mince était interposée devant un des trous dans une expérience d'interférométrie, les franges de déplaçaient. Fresnel développa d'autres montages, avec des lentilles ou des prismes. Fresnel obtint un poste de répétiteur à L'École Polytechnique, puis un emploi d'inspecteur des phares. Avec Arago, il allait poursuivre leurs travaux sur la nature ondulatoire de la lumière, et ce fut ensemble qu'ils réalisèrent l'expérience cruciale pour cette théorie, celle des interférences en lumière polarisée. Les études sur la polarisation avaient conduit à la séparation en deux faisceaux de la lumière, appelons les a et b. La lumière du faisceau a repassant dans le polariseur ne se dédoublait pas, mais restait a, de même pour b. On pouvait éteindre complètement a en faisant passer ce faisceau lumineux par un dispositif qui ne produit que du b. Et inversement. Les deux savants eurent l'idée de faire interférer ensemble les faisceaux a et b. Ils constatèrent qu'il n'y avait plus d'interférence. On pouvait faire interférer a avec a, b avec b, le mélange des deux, c'est à dire de la lumière naturelle, mais on ne pouvait pas faire obtenir d'interférence entre les faisceaux a et b. Cette expérience, cruciale, montra que la lumière était bien une onde, mais ce n'était pas une onde longitudinale comme le son, mais une onde transverse, comme les ondes sur l'eau.

Le vecteur d'onde, perpendiculaire au rayon lumineux est dans un plan. Il se décompose en deux vecteurs indépendants. Avec la polarisation on réalise cette décomposition. Chaque vecteur ne peut interférer qu'avec un vecteur étant dans la même direction, d'où le résultat de l'expérience d'Arago et de Fresnel.

# **Théorie ondulatoire transverse de la lumière de Fresnel**

## **Arago ne croit pas à l'existence de l'éther**

Avec cette expérience, la théorie ondulatoire acquit des bases solides et Fresnel allait poursuivre le travail de modélisation, laissant Arago à d'autres tâches. Arago a été beaucoup critiqué pour avoir abandonné Fresnel avant la publication de la théorie complète. Certains ont même indiqué qu'en fait Arago ne croyait pas à cette théorie, parce qu'il n'était pas d'accord avec l'existence de l'éther, support sur lequel l'onde lumineuse doit s'appuyer. C'est mal comprendre l'activité d'Arago, qui était intéressé par l'expérimentation, et ne se sentait pas motivé par les développements théoriques, alors qu'au contraire Fresnel était venu à l'expérience pour prouver sa théorie ondulatoire. Arago a su reconnaître l'originalité et la valeur des travaux de Fresnel, et de lui laisser la paternité complète de sa théorie ondulatoire de la lumière. Cela ne doit pas occulter son propre rôle.

Comme le rappelle John A. Cawood dans sa thèse *The Scientific work of Arago*, l'éloge de Fresnel contient une explication parfaitement claire de ses réticences. Arago pensait que la lumière était une onde longitudinale. La transmission de ces ondes dans un milieu élastique tenu était possible. À partir de l'expérience d'interférences en lumière polarisée, le support de transmission des ondes, l'éther, changea de nature. Le savant allemand Chladi avait publié en 1802 un traité d'acoustique, traduit en France en 1803, qui avait eu une grande influence sur Savart et Poisson. Il avait montré alors que la propagation d'ondes transverses ne pouvait s'effectuer que dans un milieu rigide ou semi-rigide. L'astronome qu'était Arago ne put supporter l'idée d'un tel éther, car il lui rappelait trop l'éther de la théorie des Sphères cristallines qui composaient l'Univers de Platon et d'Aristote. Depuis Copernic, la querelle sur la structure de l'Univers avait conduit, après de rudes combats, à évacuer ce concept de l'éther. Pour les astronomes, l'espace infini était vide, en dehors des différents astres qui le peuplaient. Avec la théorie des ondes transverses, il fallait donc imaginer un tel milieu, avec des curieuses propriétés comme celle de l'entraînement partiel que nous avons déjà mentionné à l'occasion de l'expérience d'observation de l'aberration annuelle des étoiles avec un prisme.

# Problème de l'éther

Qu'en est-il aujourd'hui ? Avec la théorie des quanta, Max Planck, puis Albert Einstein ont conduit à l'élimination du concept d'éther. La lumière est formée de particules, les photons, qui n'ont donc pas besoin d'un support matériel pour se propager. L'éther n'est plus nécessaire. Mais alors la théorie ondulatoire avec ses interférences, la polarisation, etc., que devient-elle ? Les physiciens ont accepté l'idée d'une dualité Onde-Particule. La lumière cumule ces deux états. Ainsi, il faut bien admettre, pour qu'il puisse y avoir interférence, qu'un photon passe par deux trous en même temps. Alain Aspect a réalisé une expérience célèbre qui le prouve. Pendant tout le XXIème siècle les savants ont débattu de cette dualité, et ont cherché à dépasser le modèle mathématique pour en comprendre la substance. Aujourd'hui, grâce aux travaux des astronomes, il semble qu'une partie notable de l'énergie (70%) de l'Univers serait soit dans le vide, soit dans une substance universelle ayant des propriétés solides, que certains nomment *quintessence* en souvenir des thèses d'Aristote sur la constitution de la matière. A-t-on identifié l'éther, dont l'existence n'avait jamais été considérée comme impossible par la relativité ?

# La scintillation des étoiles

Lorsque Fresnel contacta Arago, celui-ci était préoccupé par les phénomènes optiques, qui n'entraient pas dans le cadre de la théorie de l'émission de Newton. Le phénomène de scintillation des étoiles était connu depuis des temps immémoriaux. Qui n'avait pas constaté que les étoiles scintillaient la nuit dans le firmament ? Cela provenait-il de la nature des étoiles, du mécanisme de la vision ou d'un phénomène agissant sur le parcours ? Arago étudia toutes les propositions effectuées et proposa vers 1814 que la scintillation était due à des interférences entre les rayons lumineux passant dans l'atmosphère. C'est l'interprétation moderne ; naturellement Arago ne disposait pas des outils mathématiques permettant de préciser son interprétation, mais il a donné la clé de l'énigme, des interférences constructives et destructives qui fluctuaient en raison de l'agitation de l'atmosphère.

## Des instruments scientifiques



Le polarimètre d'Arago

[http://astro-canada.ca/\\_fr/a2312.php](http://astro-canada.ca/_fr/a2312.php)

Ses travaux d'optique, sur la réfraction, sur la polarisation et sur l'interférométrie allaient l'amener à proposer de nombreux instruments d'optique originaux. Nous verrons qu'il renouvela la photométrie des étoiles avec un photomètre totalement original basé sur la polarisation et la loi de Malus. Parallèlement il transforma son polariscope, simple lunette qui permettait d'évaluer si la lumière était ou non polarisée, en un polarimètre instrument conduisant à la mesure effective des taux de polarisation.

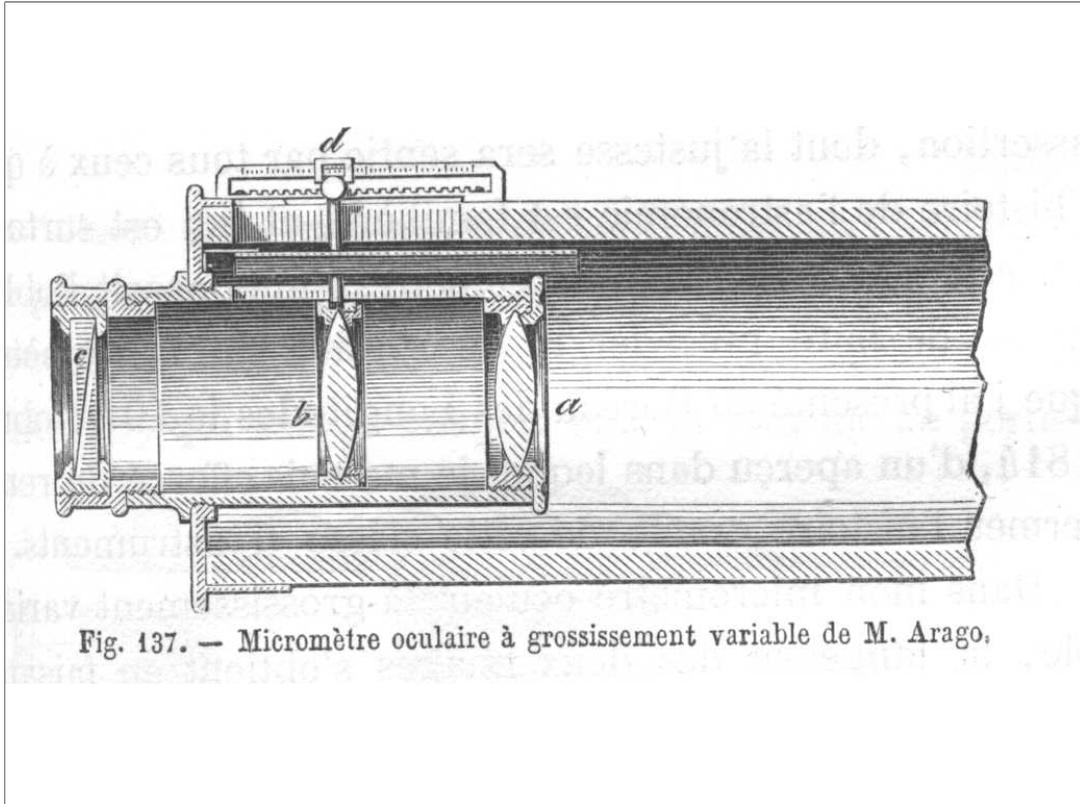


### Cyano-polarimètre d'Arago

<http://softs.polytechnique.fr/dsi/ksup/MuseeVirtuel/W3patrimoine/index.php?PAGE=Cyano&TYPE=optique>

Il eut l'idée ensuite de transformer son photomètre en cyanomètre c'est-à-dire en un instrument capable de mesurer la couleur d'une lumière. Ce fut l'occasion d'un conflit extrêmement sérieux avec Biot. Arago lui expliqua au cours d'une discussion dans la rue le principe de son instrument, à la session suivante de l'Académie Biot proposa une note décrivant le cyanomètre. Évidemment Arago explosa de colère, et les académiciens assistèrent à un duel oratoire qui se termina à l'avantage d'Arago. Les rapporteurs constatèrent aisément les travaux d'Arago. Pendant deux ans Biot n'osa plus se montrer à l'Académie.

En prenant conscience que la lumière réfléchiée par les vagues était polarisée, Arago imagina une lunette anti-écueil pour les marins, bien avant l'existence des lunettes Polaroids qui assurent aujourd'hui cette fonction.



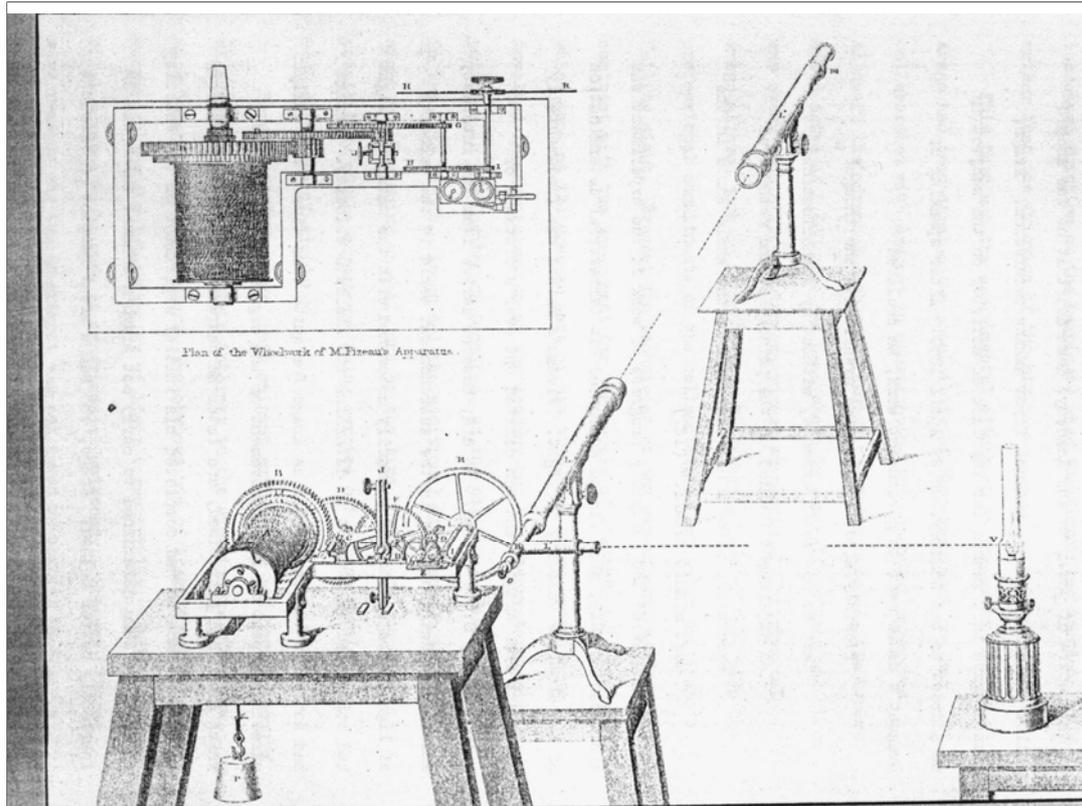
### Micromètre d'Arago

Prenant partie de ses travaux sur la réfraction et sur l'interférométrie, il imagina un instrument précis de mesure des indices, en se basant sur l'interférométrie. L'artisan qui le fabriqua arriva à en vendre quelques-uns.

Arago imagina d'autres instruments pour l'observation astronomique, dont deux micromètres avec lesquels il s'acharna à obtenir la mesure de la parallaxe de 61 Cygni.

# La mesure de la Vitesse de la lumière

En 1838, Arago, après avoir pris connaissance de la manière avec laquelle Wheastone avait mesuré la vitesse des courants électriques, en déduisit un montage pour mesurer la vitesse de la lumière. Bien sûr, on l'avait déjà estimée, directement par Roemer, et indirectement par l'aberration annuelle, qui donnait une très bonne précision, à quelques pour-cent près. Mais il s'agissait de la vitesse de la lumière dans le vide. Arago voulait déterminer directement la vitesse de la lumière dans un autre milieu, l'eau ou le verre, car l'enjeu scientifique était essentiel. Malgré tous les succès remportés par la théorie ondulatoire les partisans de la théorie de l'émission ne se décourageaient pas, et la mesure de la vitesse de lumière dans un milieu réfringent était indispensable pour clore le débat. La théorie de l'émission conduisait à une vitesse supérieure dans un milieu réfringent que dans le vide, la théorie ondulatoire au contraire donnait une vitesse plus faible. Le montage était difficile, basé sur des miroirs tournants, et Arago ne disposait pas du temps nécessaire pour réaliser l'expérience. Pourtant l'enjeu était essentiel.

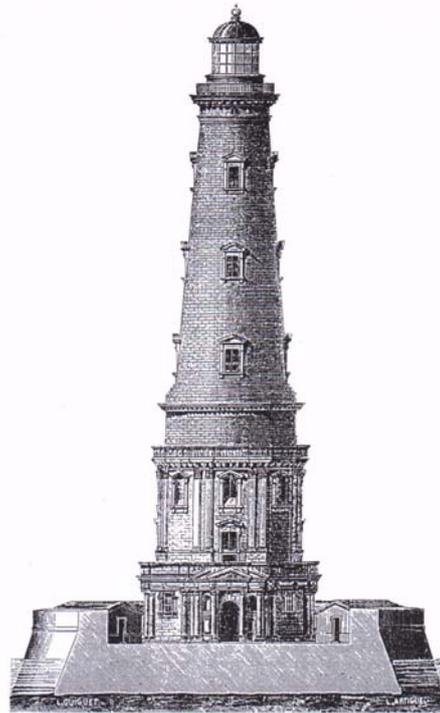


Le schéma de l'expérience de Fizeau

Ce fut son jeune collaborateur Hyppolite, Armand Fizeau qui réalisa en 1850 la première mesure de la vitesse de la lumière en laboratoire. Il remplaça le miroir tournant par une roue dentée, montage plus facile à faire. L'année après Léon Foucault, un autre jeune collaborateur d'Arago, réalisa l'expérience telle qu'elle avait été proposée par Arago, et trouva une valeur identique aux erreurs près à celle de Fizeau. En comparant la vitesse dans l'eau et dans le verre il trouva un rapport des vitesses conforme à la théorie ondulatoire, montrant enfin que la lumière se déplaçait selon le principe de moindre action, suggéré depuis longtemps par Pierre Fermat, et repris par Maupertuis.

La théorie de l'émission de Newton était morte, provisoirement, car elle allait renaître avec Einstein dans le cadre de son interprétation de l'effet photoélectrique. Mais ce n'était plus tout à fait la même théorie. Le grain était aussi onde. Un siècle après ce n'est toujours pas facile à comprendre la dualité onde particule.

# Les Phares

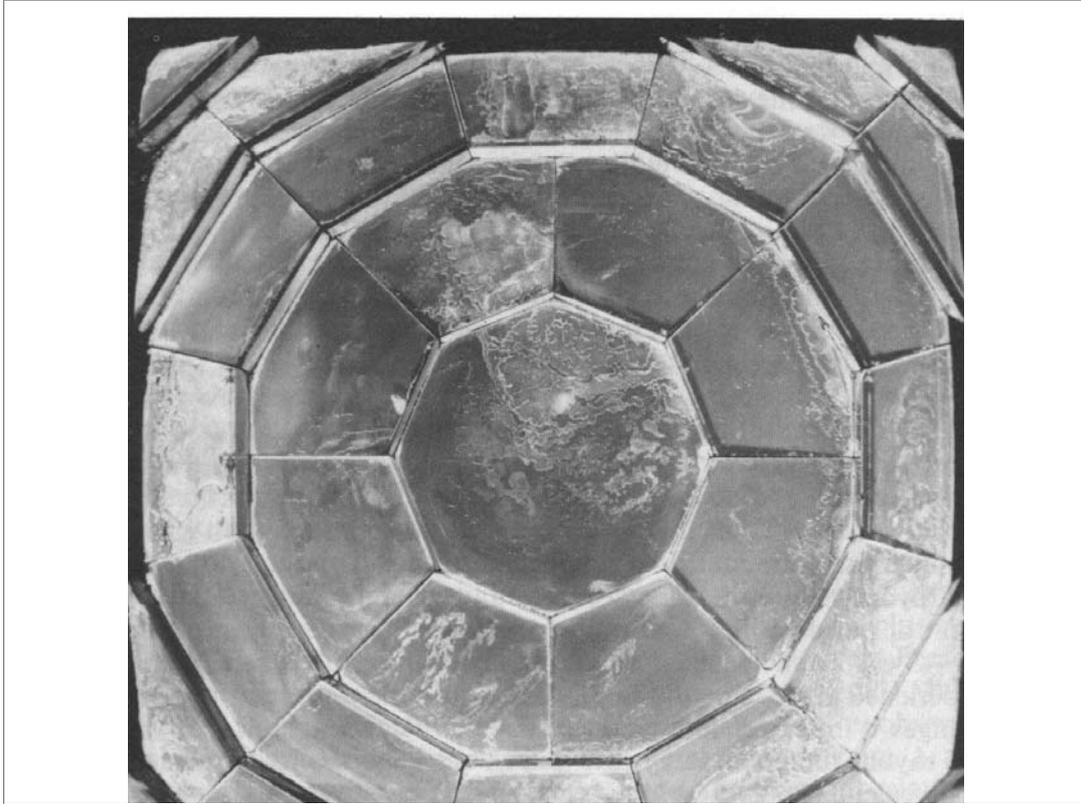


**Le phare de Cordouan.**  
Situé à l'embouchure de la Gironde, ce fut le premier phare équipé,  
dès 1823, des lentilles à échelons inventées par Fresnel  
(in Figuière, *Merveilles de la Science*).

## La Phare de Courdouan

Les Français à la Restauration étaient très en retard sur les Anglais pour l'équipement en phares des côtes. La nuit de nombreux bateaux étaient perdus en mer faute de cet éclairage indispensable. Arago fit partie de la commission chargée d'examiner la mise à niveau de ces équipements. Ce fut ainsi qu'il obtint pour Augustin Fresnel un poste d'Inspecteur des Phares. Ce qui allait permettre aux deux physiciens d'améliorer très sensiblement la conception de l'éclairage des phares.

D'une part Arago et Fresnel proposèrent un nouveau système de mèche permettant d'augmenter la luminosité d'un facteur trois à quatre, d'autre part Fresnel fit réaliser des lentilles à échelon qui permettent d'avoir une ouverture suffisamment grande pour diffuser cette lumière de manière optimale.



## Lentille de Fresnel

La lentille de Fresnel était en fait une vieille idée proposée par Buffon. Ne sachant pas réaliser des lentilles dont le rapport entre le diamètre et la distance focale était élevé, ce savant proposa de les réaliser par des échelons, avec des pièces de verre ayant la bonne courbure. Condorcet indiqua un moyen technique de réalisation, avec différentes pièces de verre assemblées avec du plomb. Ce fut ce que réalisa Fresnel. En 1823 le Phare de Cordouan, situé à l'embouchure de la Gironde, fut le premier équipé d'une lentille de Fresnel, et d'un éclairage Arago-Fresnel. Sa portée était la plus élevée pour cette époque.

Le concept de lentille à échelon reste toujours d'actualité ; des lentilles de Fresnel, de très faible épaisseur, équipent les rétroprojecteurs.

Cette réalisation fournit une occasion pour Arago de polémiquer avec Brewster sur la paternité de l'invention. Il fit une longue étude historique pour détruire cette revendication et de montrer le rôle essentiel des savants français dans cette invention.

Une ligne de phares allait être construite le long des côtes françaises, sous les instructions des deux savants. Arago montra plus tard, statistique à l'appui, que cet investissement a évité de nombreux naufrages.