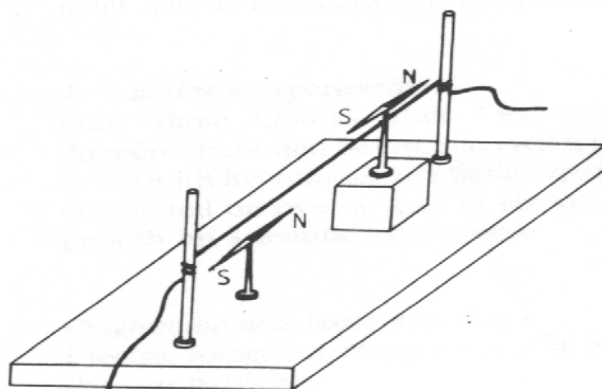


# Un pionnier de L'électro-magnétisme



## Expérience d'Oerstedt

En 1819 Arago venait avec Fresnel de montrer que la lumière était une onde transversale. Il fut invité à Genève pour présenter ses travaux. Au cours de la discussion les Genevois l'informèrent de la surprenante découverte d'un professeur danois Oersted, un courant électrique dans un fil pouvait dévier la boussole. Cette nouvelle bouleversa Arago car parallèlement à ses travaux d'optique il était chargé par le BdL de mesures du magnétisme terrestre et il avait remarqué le comportement anormal de sa boussole. L'expérience d'Oersted pouvait être la clé du mystère du magnétisme terrestre, ce fut pourquoi Arago n'hésita pas, en rentrant à Paris, à laisser provisoirement tomber ses expériences d'optique pour ce nouveau domaine de recherche. Quelques biographes ont été très critiques sur ce changement, mais ils oublièrent qu'Arago n'était pas guidé par l'interprétation théorique, mais qu'au contraire c'était l'expérimentation qui le poussait.

# Aimantation par un courant électrique



André-Marie Ampère (1775-1836)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie\\_Amp%C3%A8re](http://fr.wikipedia.org/wiki/Andr%C3%A9-Marie_Amp%C3%A8re)

Pour produire un courant électrique, il fallait une pile. C'est bien facile aujourd'hui, il suffit d'aller dans les très nombreux magasins qui en vendent. Mais en 1820, avoir une Volta c'était l'équivalent d'avoir aujourd'hui son accélérateur de particules. L'École Polytechnique avait la sienne. Cette pile avait été installée sous l'Empire, et en 1816 des critiques acerbes avaient été publiées sur le gaspillage qui avait été réalisé, au vu des résultats obtenus. Arago y avait répondu en mentionnant les travaux de Gay-Lussac et de Thénard, mais cet investissement restait discutable. Arago allait donc s'adresser à L'École Polytechnique. André Marie Ampère y exerçait des fonctions de répétiteur de géométrie. Informé par Arago de l'expérience d'Oersted, il allait aussi s'intéresser au phénomène. Les deux physiciens travaillèrent en parallèle, chacun réalisant son expérience, en faisant part à l'autre de ses propres résultats. Cette collaboration se fit d'une manière étonnamment loyale. Ni Ampère, ni Arago n'ont eu à se plaindre d'un pillage de l'un par l'autre. L'Histoire des Sciences a surtout retenu le nom d'Ampère pour ces travaux, essentiellement parce qu'il alla au-delà de l'expérimentation, pour déduire des lois et pour interpréter les résultats. Arago était le plus souvent resté au niveau expérimental, en proposant des applications aux montages réalisés.

# L'électro-aimant

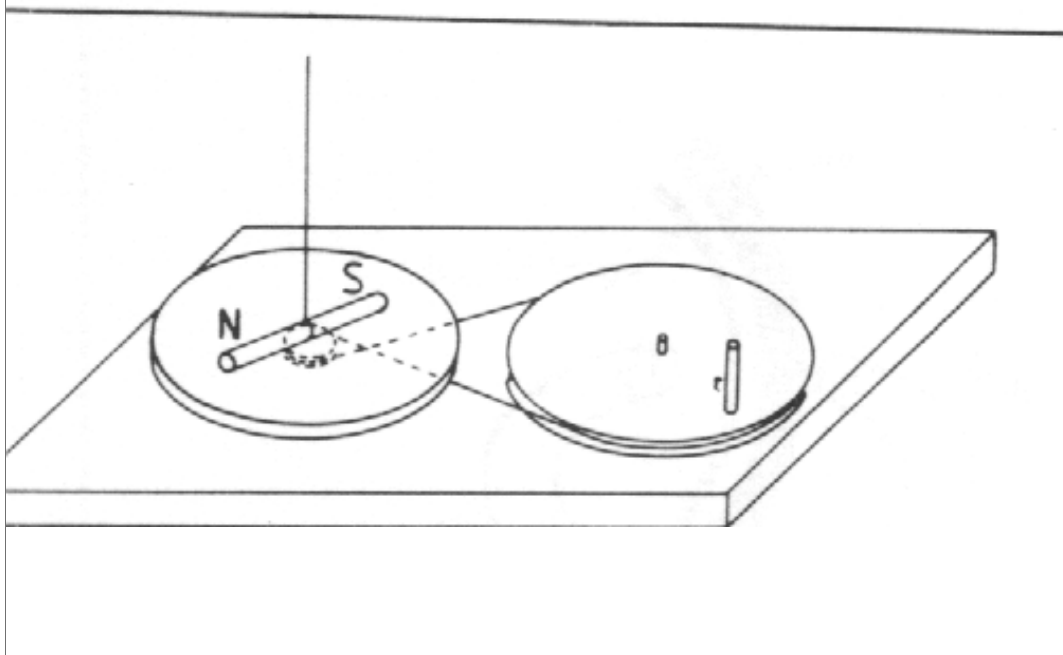
Un des premiers résultats d'Arago, en septembre 1820, concerna l'attraction de la limaille de Fer par un fil dans lequel passait un courant électrique. Ensuite il montra que ce courant créait une aimantation momentanée sur du fer ou de l'acier. Pour améliorer les performances, Ampère inventa alors la bobine solénoïde qui fut utilisée par la suite pour toutes les expériences, et qui est toujours amplement utilisée. Ironie du sort, ces découvertes ont été faites grâce à cette pile Volta de L'École Polytechnique qui avait été construite à grand frais, et dont beaucoup disaient qu'il s'agissait d'une dépense inutile.

Ce fut avec ce montage qu'Ampère et Arago inventèrent l'électro-aimant. Il ne s'agissait pas, bien sûr, des monstres d'acier capables de soulever des tonnes, mais l'idée était là, et cela marchait.

Une des applications de ces travaux concernait la transmission d'un message par l'électricité, le télégraphe électrique fut proposé par Ampère au cours de cette fructueuse période.

Ampère approfondit ces études, réalisant l'expérience remarquable d'attraction des fils où passait un courant électrique, transformant un tel fil en un aimant. Ampère proposa des lois et une théorie de ces phénomènes, mais Arago était déjà préoccupé par d'autres problèmes.

# Le magnétisme de rotation



## Expérience du magnétisme de rotation

En 1822 Arago, Biot et Humboldt allèrent à Londres, une fois de plus pour le raccordement des mesures géodésiques. Ils avaient amené quelques instruments, dont une boussole. En travaillant sur la colline de Greenwich, Arago fut surpris de l'inertie de cet instrument. Il fit quelques expériences, et la sortit de son boîtier. Il trouva alors que l'instrument répondait normalement. La boîte contenait une armature de cuivre, et effectivement il avait eu vent de problèmes sur des boussoles contenues dans des boîtiers métalliques. Il a voulu alors en savoir plus.

De retour à Paris, il fit des expériences avec des pièces métalliques et un aimant. Il pensa que si une plaque métallique fixe agissait sur un aimant oscillant, inversement cette plaque en rotation devait agir sur un aimant fixe. Il découvrit ainsi le magnétisme de rotation, une pièce métallique en rotation créait un champ magnétique qui perturbait l'aimant.

L'anglais Barlow allait protester au sujet de la paternité de la découverte, mais les dates des publications étaient suffisamment claires pour qu'elle fut effectivement attribuée à Arago. La Royal Society de Londres lui décerna la médaille de Copley en 1825 pour cette remarquable découverte.



Michael Faraday (1791-1867)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](http://fr.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)

Arago fut de plus en plus absorbé par ses innombrables fonctions. Il ne pouvait pas aller plus avant dans cette étude. Ce fut le physicien anglais Faraday qui interpréta ce phénomène dans sa théorie globale de l'induction électrique.

Dans cette activité les éléments caractéristiques de l'attitude d'Arago se retrouvent : un sens aigu de l'observation, lié à une connaissance très étendue des phénomènes physiques, la curiosité d'aller au-delà dans l'identification du phénomène, le génie de l'expérimentation, mais aussi le renoncement à essayer de réduire le phénomène dans une loi ou de l'enfermer dans une théorie. Ce sont des Biot, Fresnel, Ampère, Faraday qui restent honorés dans l'Histoire pour des découvertes en grande partie initiées par Arago.

# Le magnétisme terrestre

En fait Arago était engagé sur des problèmes de magnétisme depuis 1810. À cette époque le BdL avait jugé utile d'approfondir la connaissance du champ magnétique terrestre, la boussole jouant le rôle bien connu dans la navigation. Une boussole précise était construite et à partir de 1816 Arago eut la responsabilité de noter sa déclinaison, soit son angle par rapport au méridien, et son intensité. Pour cela il comptait le nombre de battements de l'aiguille par unité de temps après l'avoir déviée. Il notait cela sur un cahier, avec le jour et l'heure, et quelques informations météorologiques, au cas où il y aurait un lien. La première boussole allait être assez vite remplacée par une boussole plus sensible, donc plus précise. Arago allait ainsi noter ces informations journalières jusqu'en 1835. La série comprenait ainsi plus de 50000 mesures, ce fut l'une des plus longues séries temporelles de l'époque.

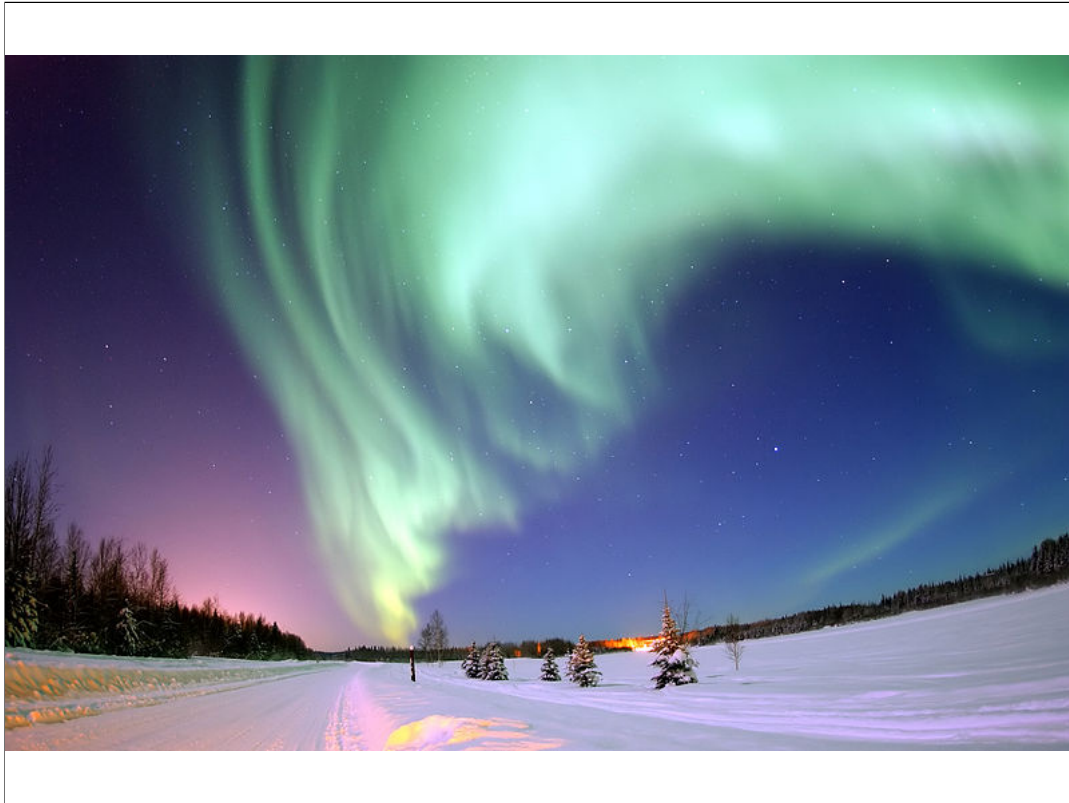
Ces informations allaient lui permettre d'une part d'établir des relations entre le magnétisme en des lieux différents, et d'autre part d'améliorer sensiblement la compréhension des phénomènes liés au magnétisme terrestre.

Comment ne pas comprendre qu'un savant travaillant depuis longtemps sur le magnétisme terrestre n'eut pas réagi instantanément à l'expérience d'Oersted ? Un courant électrique perturbait une boussole, mais alors pourquoi les phénomènes qu'il avait soigneusement notés n'étaient-ils pas liés à des phénomènes électriques ? Ce n'était donc pas le simple désir d'explorer un nouveau domaine scientifique qui l'avait conduit à abandonner ses travaux avec Fresnel pour travailler avec Ampère.

# Les Orages Magnétiques

Arago découvrit que les déclinaisons magnétiques montraient des perturbations à l'échelle de l'heure. En 1827, il montra également que l'inclinaison et l'intensité avaient aussi des variations horaires. Il fit très vite le lien entre ces variations et les aurores boréales, même si celles-ci n'étaient pas visibles à Paris. Il étudia les observations obtenues à Paris, Berlin, Kasan et dans une mine de Saxe et il constata qu'il y avait simultanément des orages magnétiques sur les déclinaisons.

En restant en correspondance avec les savants britanniques il constata que chaque orage magnétique était ainsi lié à une aurore boréale, dont il pouvait prédire l'ampleur. Ceci expliquait la simultanée des orages en des points très éloignés. L'apport d'Arago résidait dans le couplage entre un phénomène apparemment assez local, l'aurore boréale, et les perturbations magnétiques qu'il entraînait dans une zone très significative du Globe. Ce phénomène différait donc complètement des éclairs qui n'ont qu'une action très localisée.



## Aurore Boréale

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Aurore\\_polaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Aurore_polaire)

Arago constatait également que la boussole était aussi sensible aux orages atmosphériques. L'anglais Humphrey Davy avait publié une expérience de déviation de l'éclair dans un arc électrique par un aimant, Arago en conclut une analogie entre les aurores boréales et les très grandes décharges électriques. Le lien qualitatif entre les mouvements de la boussole et les aurores boréales avait été déjà signalé, par exemple par Halley, mais Arago est allé bien au-delà du constat d'une relation. Ses travaux contenaient les prémises de l'interprétation moderne des aurores boréales, grandes décharges électriques dues au vent solaire piégé par la magnétosphère. Il avait bien perçu qu'il s'agissait de décharges, mais pour l'origine des charges il a fallu attendre la seconde moitié du XXIème siècle.

En 1818 Arago montra également que la déclinaison magnétique présentait également des variations séculaires. Cependant, ce phénomène n'avait pas de relation avec les orages magnétiques.

Une autre boussole avait été construite pour déterminer l'inclinaison magnétique, c'est à dire son angle par rapport au plan horizontal. En 1825 Arago a montré et analysé les variations diurnes et séculaires de cet angle.



# **Le Physicien des Gaz**

## **Masse spécifique de l'air**

Au cours de son premier travail avec Biot, Arago étudia avec précision la masse spécifique de l'air. Cette donnée intervenait pour corriger la distance zénithale d'une étoile de la réfraction atmosphérique. Les tables d'Arago ont été utilisées pendant longtemps sous les coupes des astronomes.

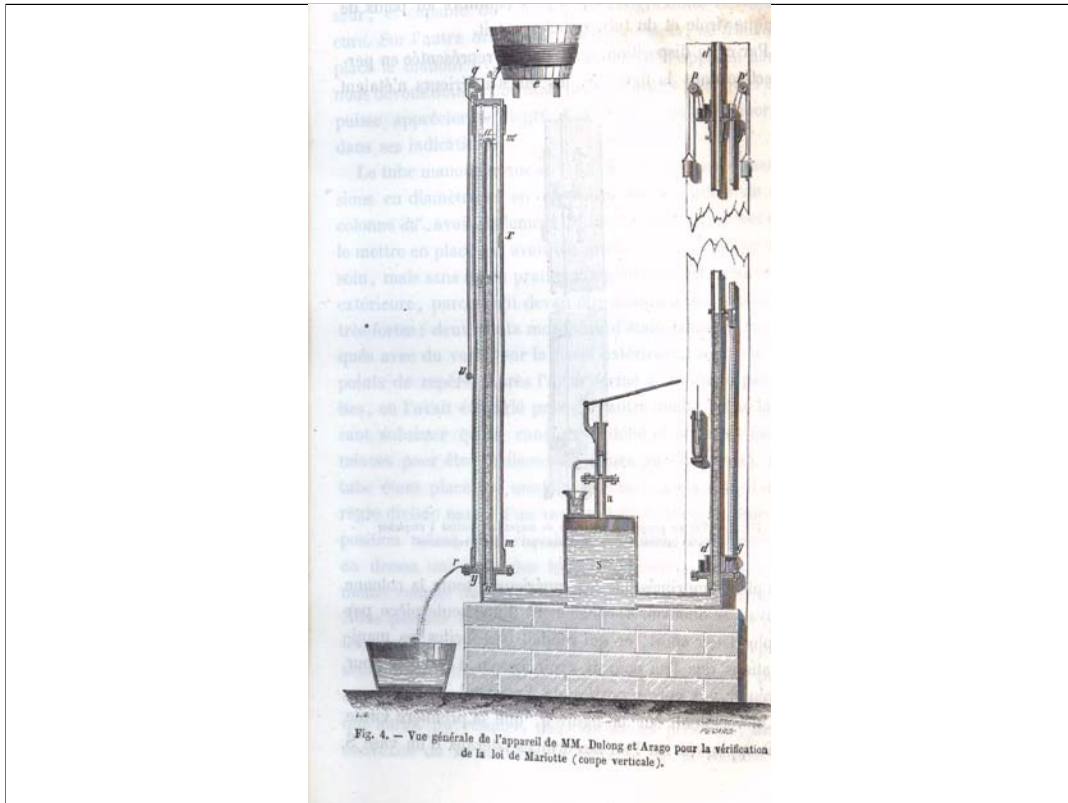
# La loi de Mariotte aux fortes pressions



Pierre-Louis Dulong (1785-1838)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_Louis\\_Dulong](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_Louis_Dulong)

Au début des années 1820, la révolution industrielle commença à se développer en France. Des moteurs à vapeur étaient mis en œuvre dans les usines ou pour tracter les wagons. On les construisait sans connaître les limites en température. Des explosions, dues à ces moteurs poussés à de trop hautes pressions, firent de nombreuses victimes. Le Gouvernement interpella l'Académie des sciences pour déterminer le lien entre la température de l'eau et la pression de sa vapeur. L'Académie désigna le physicien Pierre-Louis Dulong et Arago. Les physiciens avaient à peu près le même âge. Dulong était de la promotion 1801 de L'École Polytechnique. Il allait être nommé académicien en 1823 Il fut aussi chimiste et médecin, et membre de l'Académie de médecine. Ce fut un grand expérimentateur qui laissa son nom dans l'histoire des sciences pour une loi avec Alexis Petit concernant la chaleur spécifique d'un solide.

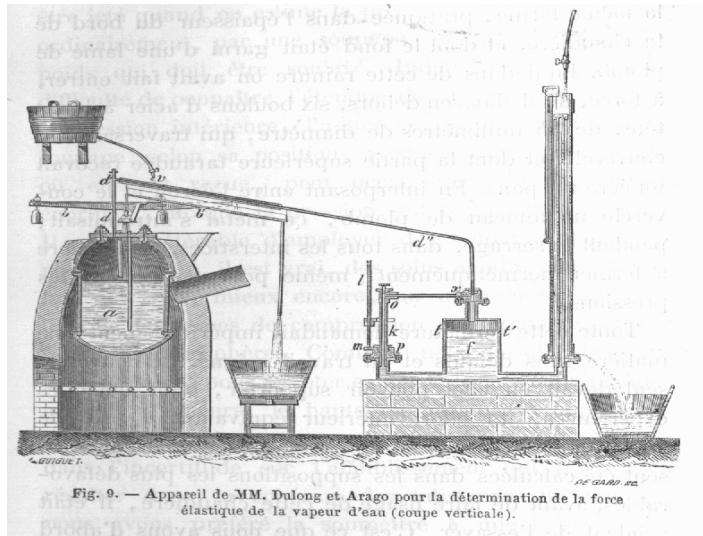


## Loi de Mariotte aux fortes pressions

Les physiciens allaient se mettre à la tâche dans un local mitoyen avec l'actuel lycée Henri IV près du Panthéon. Ils commencèrent par étudier la relation entre la pression du gaz et le volume aux hautes pressions. Pour un gaz parfait le produit de la pression et du volume comprimé est constant. Cette relation est connue sous le nom de loi de Mariotte en France, alors que dans la plupart des autres nations elle porte le nom de l'anglais Boyle. Il semble assuré que c'est bien ce dernier physicien qui fut le premier à avoir montré cette relation.

Les physiciens allaient ainsi vérifier, qu'aux erreurs près le produit de la pression et du volume restait constant. Ils ont pu étendre jusqu'à la pression de 24 atmosphères, ce qui était bien au-delà des mesures précédentes.

# La pression de la vapeur d'eau

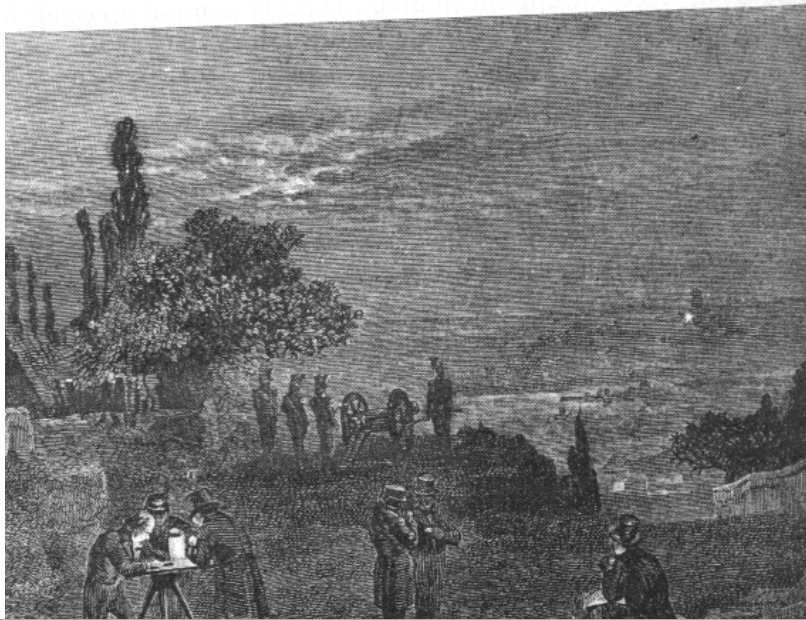


## Expérience sur la pression de la vapeur d'eau

Après avoir étendu cette loi de Boyle-Mariotte, les physiciens passèrent à la seconde phase de leurs travaux, déterminer quelle est la relation entre la pression de la vapeur d'eau et la température. Ils construisirent un second appareil permettant de faire bouillir de l'eau à très hautes pressions, en minimisant les risques d'explosion. Ils l'avaient installé contre le mur mitoyen du Lycée. Le principal de cet établissement ayant entendu parler de cet instrument dangereux situé si près de son établissement alerta les autorités et les physiciens durent le déménager à l'Observatoire de Paris.

Leurs travaux dangereux conduisirent à définir comment devaient être calibrées les soupapes qui équipaient les machines à vapeur. Des travaux similaires avaient bien sûr été menés ailleurs, mais l'information circulait mal. Arago indiqua dans ses *Œuvres* que l'extension réalisée avec Dulong correspondait à un très sérieux progrès dans la connaissance de ce phénomène.

# La Vitesse du Son



## Expérience sur la vitesse du son

Laplace avait construit une théorie pour la propagation du son et il en avait déduit une vitesse théorique. Quelques années plus tard Gay-Lussac modifia légèrement la théorie de Laplace et obtint un terme correctif qui dépendait du rapport des chaleurs spécifiques de l'air. Il fallait vérifier cette loi, et les physiciens décidèrent d'aller sur le terrain faire l'expérience. Ce n'était pas facile à cette époque. Un soir d'octobre 1822, six grands savants allèrent dans la banlieue sud de Paris, trois à Montlhéry, Arago, Mathieu et Humboldt, trois à Villejuif, Laplace, Gay-Lussac et Prony. Les astronomes avaient déterminé avec précision la position de leur point d'observation. Ils avaient amené des lunettes et, pour mesurer les temps et la longitude, un chronomètre. Il y avait environ vingt-deux kilomètres entre les deux sites. Le canon fut tiré de part et d'autre et les astronomes estimèrent les temps entre les éclairs lumineux et le son du canon. Ils n'obtinrent pas tout à fait les mêmes résultats. Il y avait un peu de vent et le son allait plus vite dans le sens du vent que pour l'inverse. Finalement, les physiciens obtinrent très exactement la formule de Gay-Lussac, validant ainsi sa théorie.

# **Le Physicien Solaire**

Il ne faut pas oublier qu'Arago était d'abord un astronome. Son activité dans ce domaine a été aussi très brillante et on lui est redevable de plusieurs découvertes et de plusieurs mesures importantes. C'est peut-être dans le domaine de la physique solaire que ses travaux présentent le plus d'originalité.

# Nature Gazeuse du Soleil

La nature du Soleil était l'une des questions les plus mystérieuses depuis la plus haute antiquité. Toutes les réponses avaient été données par les esprits les plus brillants et les plus érudits de leur époque. Pour les uns, tels Herschel c'était un solide, tel un immense disque d'or, pour d'autres, comme La Hire c'était un liquide. Pour beaucoup d'autres encore c'était un feu gazeux. Comment le prouver ? En 1817 Arago proposa et réalisa une expérience d'une très grande originalité. Grâce à son polariscope il avait remarqué que les solides et les liquides incandescents émettaient une lumière dont la polarisation au bord était facilement détectable avec son instrument. Par contre, les gaz ne présentaient aucune polarisation tangentielle.

Il examina donc le Soleil du centre au bord et constata qu'il n'y avait aucune polarisation le long du disque et il en conclut que le Soleil est de nature gazeuse. Ce résultat fut cité amplement par les savants de son époque, jusqu'à la fin de son siècle. Aujourd'hui ce résultat est oublié, car les preuves venant des analyses spectroscopiques sont préférées. La nature du Soleil se démontre ainsi sans artifice. Mais du point de vue de l'Histoire de l'Astronomie, c'est Arago qui donna la première preuve expérimentale de la nature gazeuse de notre étoile.

## Mesure de l'assombrissement centre-bord

C'est aussi une vieille interrogation restée très longtemps sans réponse décisive. Le Soleil était-il un disque de luminance uniforme ? Plusieurs astronomes avaient remarqué qu'il semblait que le bord était plus sombre que le centre, mais des mesures quantitatives précises étaient exclues. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle Bouguer avait estimé le rapport des luminances bord/centre à 0,625. C'est grâce à l'invention de son photomètre qu'Arago put obtenir une mesure plus précise du rapport. Il trouva la valeur 0,975 bien plus forte, ce qui avait de l'importance pour une théorie de l'atmosphère du Soleil.

Cet assombrissement put être vérifié grâce à l'invention de la photographie. Fizeau et Foucault ont réalisé la première photographie du Soleil, qui montra d'une manière indubitable cet assombrissement du centre au bord.

La valeur admise aujourd'hui est de ..



# L'atmosphère du Soleil

L'observation des taches sur le Soleil est très ancienne. Toutefois ce n'est qu'en 1611 qu'elles commencèrent avec Fabricius à être étudiées de manière scientifique en Europe. Fabricius lui-même soupçonna l'existence de la rotation du Soleil. Ces taches noires sont restées très longtemps énigmatiques pour les astronomes. En outre les facules, taches brillantes, et les filaments, appelés lucules du temps d'Arago, avaient été quasi simultanément découverts. La granulation de la surface du Soleil ne fut découverte qu'ultérieurement avec des images de grande résolution.

Pour interpréter ces structures et compte tenu de la nature gazeuse de la surface qu'il avait montrée par l'étude de la polarisation au bord du disque, Arago imagina une structure en atmosphères superposées du Soleil : « ... *en définitive on sera obligé d'admettre que le Soleil est formé d'un noyau obscur enveloppé d'une atmosphère réfléchissante et quelque peu opaque à laquelle succède une atmosphère lumineuse ou photosphère, enfouie elle-même à une certaine distance d'une atmosphère diaphane.* » Certes c'est un peu loin des modèles actuels de l'atmosphère du Soleil, surtout en ce qui concerne l'hypothèse d'un corps sombre central. Par contre, la succession des atmosphères est effectivement conforme à la thèse admise aujourd'hui : une photosphère d'où part l'énergie lumineuse, une fine chromosphère responsable des raies d'absorption, zone où se trouvent les facules et la couronne, diaphane, c'est-à-dire très ténue. La description de l'atmosphère du Soleil par Arago est considérée par certains comme le premier pas vers la description moderne et la paternité du concept de chromosphère lui est attribuée.

# Polarisation de la Couronne

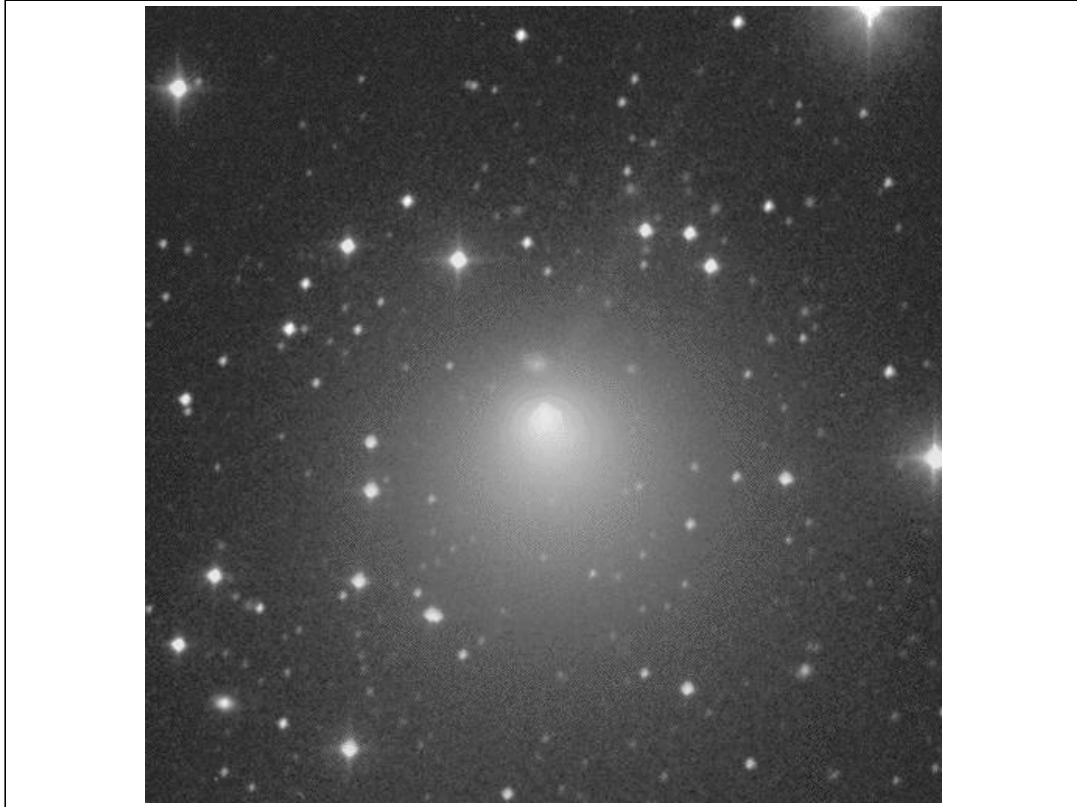
L'observation de la couronne solaire n'est possible que lors des éclipses. Les témoins ayant d'excellentes capacités d'observation avaient donné du spectacle des descriptions très différentes et parfois contradictoires. Arago lui-même avait été témoin de plusieurs éclipses et il avait alors donné sa propre description, d'ailleurs assez conforme à ce qu'on sait aujourd'hui de ce phénomène. Le débat sur l'origine de la couronne était très vif : un phénomène atmosphérique, une atmosphère autour de la Lune éclairée par le Soleil, de la diffraction de la lumière solaire sur le bord lunaire, etc. Arago écarta ces hypothèses, privilégiant une lumière propre émise par le Soleil. Son expérience sur la lumière solaire diffusée par l'atmosphère terrestre l'entraîne à penser que la lumière de la couronne devrait être polarisée.

En 1842 une éclipse totale fut visible à Perpignan. Arago s'y rendit avec l'astronome Victor Mauvais. Ils avaient amené un polariscope à bandes colorées, dit de Savart. Le spectacle fut magnifique, ils en oublièrent presque la mesure de la polarisation. Ils regardèrent chacun rapidement et constatèrent que celle-ci était très importante, malheureusement il ne leur fut pas possible de donner une valeur quantitative au phénomène.

Arago a aussi proposé la construction d'un instrument permettant d'occulter le disque brillant du Soleil et de pouvoir voir une partie de la couronne sans attendre une éclipse. Il a fallu attendre le français Bernard Lyot pour une telle réalisation dans les années 1930.

# L'astrométriste

Arago allait occuper les positions successives de d'astronome adjoint et d'astronome au sein du BdL. Il eut de nombreuses responsabilités dans cet organisme, comme la direction des observations à l'Observatoire de Paris. Mais son activité professionnelle fut profondément ancrée sur l'observation quotidienne, conduisant à des mesures de position, de flux, de diamètre, etc. , mais aussi à faire des dessins d'objets particuliers ou à noter des détails sur un astre. Pour faire son cours d'astronomie publique il se documentait et n'hésitait pas à faire de longs développements historiques sur l'origine d'une découverte ou d'un instrument. Il dressa des listes d'objets particuliers, comètes, astéroïdes, étoiles doubles, etc. Comme c'était un excellent physicien, il créa des instruments lui permettant de donner des mesures originales, parfois contradictoire avec les mesures déjà publiées. Quelles qu'étaient ses autres fonctions, le lecteur ne doit pas douter de la qualité d'astronome au quotidien que fut ce très grand savant.



### Comète de Encke

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Com%C3%A8te\\_de\\_Encke](https://fr.wikipedia.org/wiki/Com%C3%A8te_de_Encke)

Arago fut dès 1805 mis au travail, derrière la lunette pour mesurer des déclinaisons ou avec une plume pour calculer avec Alexis Bouvard les éléments d'une comète qui venait d'être découverte et qui sera beaucoup plus tard appelé comète de Encke. Il fit de nombreuses réductions de ce type, qui ne conduisirent pas à des découvertes spectaculaires, mais ces tâches étaient le lot quotidien des astronomes du BdL. Dans cet esprit, Arago a aussi participé aux calculs des tables publiées dans la Connaissance des Temps et dans l'Annuaire du BdL. Ces tables nécessitaient des observations de planètes, de la Lune, du Soleil ou des satellites de Jupiter. Toute cette activité c'était la routine d'un astronome, ce qui n'est généralement pas retenu, mais c'était la mission des astronomes du BdL d'assumer les observations et leur réduction.

# Calcul des éléments des comètes



Alexis Bouvard (1767-1843)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Alexis\\_Bouvard](http://fr.wikipedia.org/wiki/Alexis_Bouvard)

Ce ne fut qu'en 1935 que le Fonds pour la Recherche Scientifique, ancêtre du CNRS, fut créé. Pratiquement jusqu'à cette date la recherche n'était qu'une activité marginale. Les savants avaient un métier, professeur, astronome, médecin ou fermier général comme Lavoisier. Seule l'Académie pouvait subventionner des travaux par des prix, on l'a vu pour Fresnel. La pension d'académicien était insuffisante pour nourrir une famille. Les savants devaient cumuler plusieurs de ces charges pour atteindre un niveau de vie décent. Arago avait donc le métier d'Astronome, qu'il a exercé pleinement pendant toute sa carrière.

Il serait fastidieux d'établir la liste de tous ses travaux et j'ai préféré en sélectionner ceux qui m'apparaissent comme les plus représentatifs de sa démarche intellectuelle.

# Les diamètres planétaires

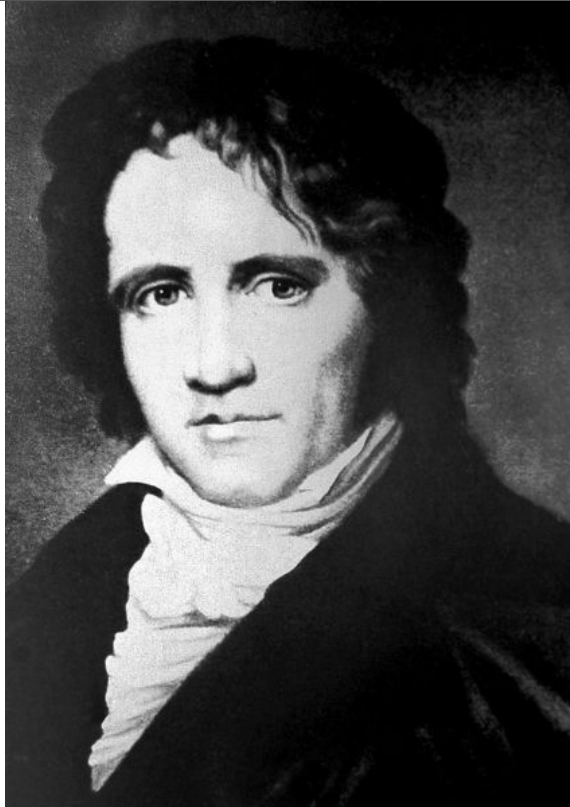
La mesure des diamètres des planètes principales a été utile, non seulement pour évaluer la dimension linéaire de l'objet, mais aussi historiquement cette information a beaucoup aidé à valider le mouvement des planètes. Si l'astre s'éloigne de la Terre, son diamètre diminue d'une manière bien prévisible par la géométrie élémentaire. Les distances peuvent être ainsi testées. Des études similaires sont possibles à partir des flux lumineux émis par les planètes, mais cette méthode est nettement moins précise.

En revenant de ses aventures en Méditerranée, Arago s'est mis à réaliser une étude systématique des diamètres des planètes et de leurs satellites. Pour obtenir des mesures précises, il inventa successivement deux instruments appelés *micromètres*, l'un à grossissement variable, l'autre constant. Un micromètre est un outil indispensable pour la mesure des distances angulaires au foyer d'un télescope. Pour l'observation d'étoiles doubles, par exemple, le micromètre permet de déterminer avec précision la distance de séparation et l'angle par rapport au méridien. Arago utilisa le sien pour la mesure des diamètres planétaires. Il put en modifier l'orientation, ce qui le conduisit à l'estimation de l'aplatissement éventuel de l'astre.

Il a pu ainsi étudier les planètes de plus grands diamètres, Mars, Vénus, Jupiter et Saturne, et en déterminer l'aplatissement. Il étudia aussi soigneusement les bandes colorées de Jupiter dont il donna une cartographie détaillée.

A l'époque des stations spatiales qui explorent Mars, les mesures d'Arago sont bien sûr complètement dépassées, mais à son époque elles furent considérées comme des éléments d'information très utiles sur ces astres.

## La parallaxe de 61 Cygni



Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_Wilhelm\\_Bessel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Wilhelm_Bessel)

L'une des questions les plus importantes de l'Astronomie au début du XIX<sup>ème</sup> siècle concernait la détermination de la distance des étoiles. Dans le cadre du système de Copernic, Galilée signala que selon la position du Soleil sur son orbite une étoile proche devait légèrement changer de position, par effet de parallaxe. C'est surtout l'astronome écossais Gregory qui précisa en 1675 la méthode. L'anglais Robert Long essaya en vain au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle de déterminer la parallaxe de quelques étoiles. Les étoiles semblaient très éloignées de la Terre. William Herschel établit quelques années plus tard une liste d'étoiles susceptibles d'être mesurables. Entre temps l'astronome anglais Mitchell avait évalué par la méthode dite des courants la distance des Hyades dans la constellation du Taureau.

Arago se lança très tôt, dès 1809, dans la mesure de la parallaxe de 61 Cygni, étoile qui lui semblait la plus intéressante, car ayant un fort mouvement apparent par rapport aux étoiles voisines. À partir de 1812 il fit une série d'observations avec Mathieu, son beau-frère. Ils publièrent leur résultat en 1834. L'astronome allemand Bessel, très connu par ailleurs pour ses fonctions, ses polynômes et son interpolation, publia un résultat similaire en 1840. Arago, qui était en relation avec l'ensemble des astronomes européens, s'étonna que ce fut le résultat de Bessel et non le leur que l'on citait comme première mesure. Il en eut l'explication dans un mémoire complet de Peters sur cette question. Au contraire de Bessel, ils n'avaient pas publié les détails des mesures, ni des calculs, mais simplement le résultat. Arago reconnut que c'était contraire à une attitude scientifique correcte. Ils reprirent leurs travaux, mais ils s'aperçurent qu'en fait leur résultat n'était pas significatif compte tenu de la précision de leurs mesures.

# La photomètre d'Arago & ses applications

Pour l'Histoire des Sciences, Bessel reste le pionnier dans la mesure des parallaxes stellaires. Son succès fut essentiellement dû à la qualité de l'instrument utilisé, l'héliomètre de Fraunhofer. Installé à l'observatoire de Koenigsberg (actuellement Kaliningrad) cet instrument avait été conçu pour la mesure du diamètre du Soleil. Bessel sut l'adapter à la mesure de distance entre étoiles.

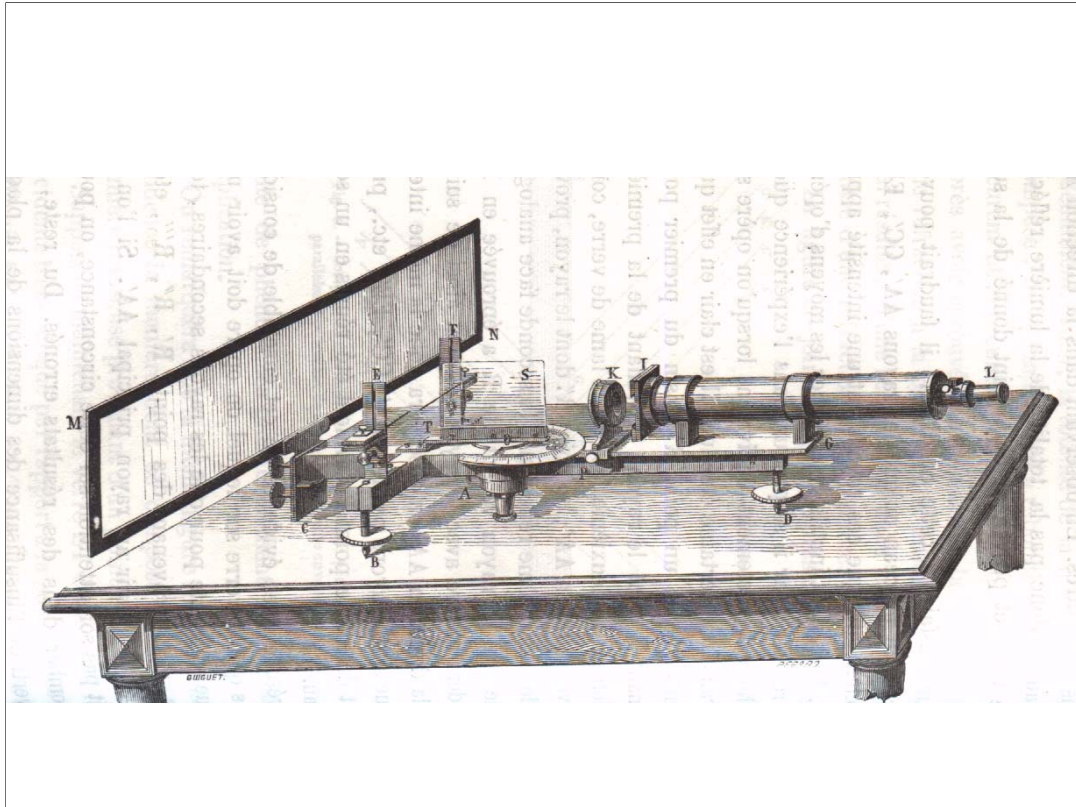
Autour de l'année 1838, Arago vérifia la loi de Malus. Le montage optique qu'il utilisa le conduisit à développer une idée totalement nouvelle pour la photométrie astronomique. À l'époque celle-ci ne pouvait s'effectuer que par des moyens visuels. L'œil est un détecteur très sensible, mais il est incapable d'effectuer une mesure absolue des flux. Les astronomes avaient constitué une échelle de grandeur complètement arbitraire, en comparant à l'œil nu des objets, mais la précision de cette évaluation était très insuffisante, de l'ordre d'un facteur deux, au moins.

Plusieurs savants avaient proposé des solutions pour améliorer les mesures :

Observer avec une lunette et fermer un diaphragme jusqu'à disparition de l'objet. On repère ainsi pour quel diaphragme le seuil de visibilité était atteint, le rapport des flux était l'inverse du rapport des diaphragmes. La sensibilité au seuil était de l'ordre de 20 à 30% ;

Comparer deux étoiles avec un instrument à deux voies, fermer le diaphragme sur une des voies jusqu'à obtention de l'égalité. L'œil était assez précis dans les comparaisons et on pouvait obtenir une mesure assez précise, de l'ordre de 10%.





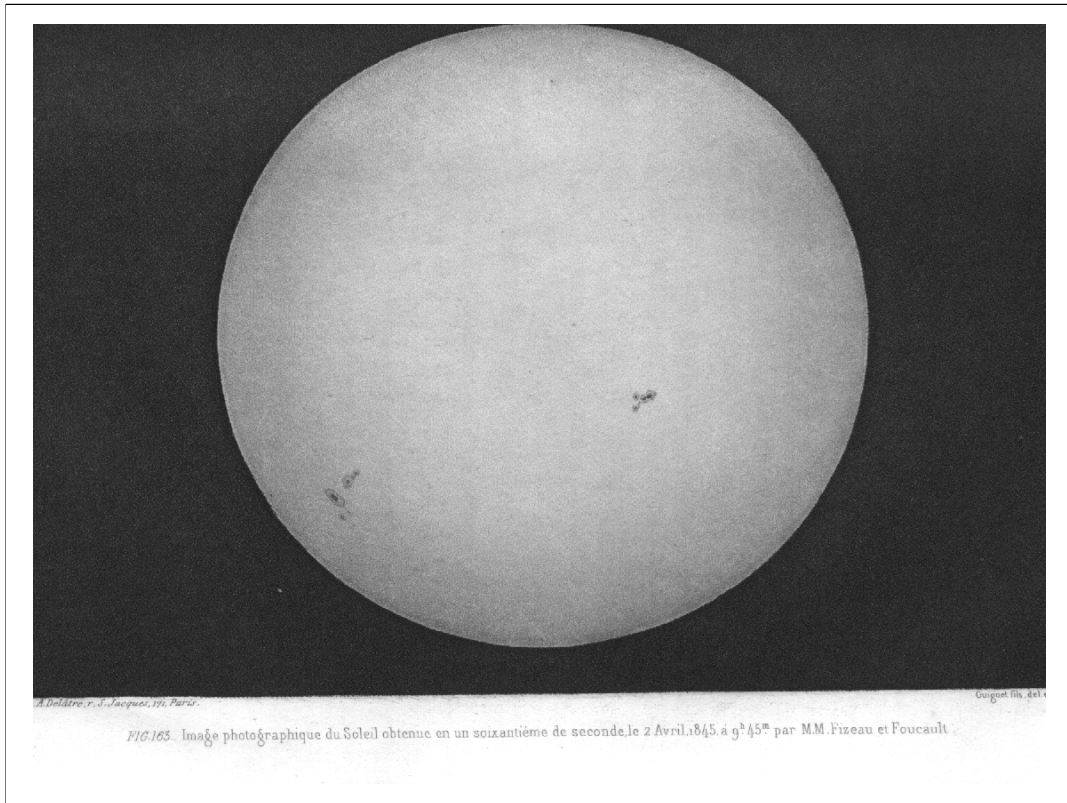
Le photomètre d'Arago

Arago pencha pour la seconde solution, mais comme c'est un opticien compétent il savait qu'en réduisant l'ouverture d'une lunette on modifiait la résolution de l'instrument et la vision que l'on avait des sources. Il proposa alors une idée très originale, d'utiliser la polarisation pour réduire le flux d'étoile d'une manière précise grâce à la loi des cosinus. Son photomètre était donc un système à deux lunettes, une pour chaque étoile, leurs images étaient formées à travers un montage optique dans lequel un des faisceaux était atténué de manière mesurable avec un cercle gradué. Comme l'ouverture ne changeait pas, la comparaison était faite de manière correcte. Bien sûr si la lumière d'une des étoiles était polarisée cela posait un problème. Mais le montage était conçu de manière à ce qu'il y avait compensation de cet effet.

Noms des étoiles.	Intensités relatives.
Sirius.....	<b>1000</b>
Wéga.....	<b>550</b>
Rigel.....	<b>417</b>
L'Épi.....	<b>310</b>
Bellatrix.....	<b>200</b>
$\pi$ d'Orion.....	<b>70</b>

Arago allait mettre cet instrument en service pour mesurer différentes sources célestes. Nous avons vu qu'il a ainsi déterminé l'assombrissement centre bord. Il allait aussi mesurer avec ses collaborateurs différentes magnitudes d'étoiles.

Arago utilisa également son photomètre pour l'étude de la lumière cendrée de la Lune. Cette lumière est due à la lumière du Soleil réfléchie par la Terre. L'étude photométrique permet de confirmer cette théorie. Vu de la Lune, la lumière cendrée est au maximum près de la Pleine Terre, c'est aussi l'époque de la Nouvelle Lune, car nous avons le Soleil à proximité de la Lune.



Photographie du Soleil prise par Fizeau & Foucault en 1845 à l'Observatoire de Paris.

Arago, directeur des observations, fit faire la première photographie du Soleil à l'Observatoire de Paris en 1845. La première photographie de la Lune fut réalisée par John Draper en 1840 aux Etats-Unis. Arago plaida sur la constitution de cartes topographiques de cet astre grâce à la photographie. Cet usage de la photographie, il le proposa pour obtenir des images de la Terre à partir de vols en ballon, et à ce titre il est considéré comme le père de la Télédétection.

# Polarisation de la Lune

Après avoir inventé sa lunette polariscope Arago la pointa sur différentes sources terrestres et extraterrestres. Le mercredi 30 octobre 1811, nota-t-il dans son cahier, il observa la Lune et remarqua que les deux images dans sa lunette polariscope étaient de couleurs très différentes. La Lune ré-émettait donc la lumière solaire en la polarisant. Les jours suivants il poursuivit et il constata que les mers étaient plus polarisées que le reste. Arago avait ainsi fait la première découverte de polarisation hors de la Terre. Il obtint ultérieurement avec son polarimètre une valeur du taux de polarisation assez proche de la valeur acceptée de nos jours.

Pour interpréter cette polarisation des mers, Arago imagina différentes possibilités, dont celle d'une atmosphère, ce qui ne lui semblait pas acceptable.

# Polarisation des Comètes

En 1818, une nouvelle comète fut découverte par Pons, celui qui était allé le voir au Lazaret de Marseille en 1809. Arago pointa à nouveau sa lunette polariscope sur cette comète et constata qu'également la queue de la comète était hautement polarisée. L'hypothèse de diffusion de la lumière, comme pour la polarisation de la lumière de l'atmosphère ou des halos, lui semblait parfaitement correcte.

Alexis Bouvard calcula les éléments de cette comète, un membre du BdL (probablement Arago lui-même) remarqua que ses éléments étaient les mêmes que ceux de la comète de 1805, dont le calcul d'orbite avait été également réalisé par *l'infatigable calculateur* (surnom donné à Bouvard par Arago). Il s'agissait donc de la seconde comète périodique, après celle de Halley. Les membres du BdL n'ont pas le temps d'approfondir cette question en vue d'une publication que le directeur de l'Observatoire de Berlin, Encke, annonçait la découverte. Cette comète s'appelle ainsi comète d'Encke. Elle aurait pu s'appeler comète d'Arago...

# Le Physicien de la Terre

La distinction entre Astronome et Physicien du Globe est récente. Les membres du BdL avaient des tâches qui recouvraient les deux disciplines. La Terre était une planète, avec ses particularités, alors sa physique et sa dynamique devaient être aussi étudiées sous l'angle astronomique.

Nous avons déjà aperçu plusieurs des travaux d'Arago relatifs à la Terre : les halos, la météorologie, le magnétisme terrestre et les aurores boréales. Ceci ne constitue qu'une partie des thèmes sur la physique de notre planète abordés par Arago.

# Les Voyages Scientifiques

Une grande partie de ses travaux a été réalisée dans le cadre d'études de l'Académie des Sciences. L'Institut armait des bateaux pour des voyages scientifiques. Avant leur départ une commission de savants, physiciens, astronomes, géologues et naturalistes, examinait l'expédition sous tous ses angles : instruments à emporter, mesures à effectuer et protocole correspondant, itinéraire bien sûr, et diverses recommandations pour que ce voyage s'effectuât au mieux et de la manière la plus profitable. Au retour, les capitaines ramenaient le matériel confié par l'Académie, ils rendaient leur carnet de bord, avec les mesures réalisées, et ils donnaient les échantillons naturalistes au Jardin des Plantes et au muséum d'histoire naturelle. C'est ainsi qu'un capital important de connaissances s'est constitué en France.

La commission de savants analysait toutes ses données, et effectuait un rapport à l'Institut. Au cours des années d'activité d'Arago à l'Académie, de nombreux voyages ont été ainsi organisés, il a ainsi contribué avec Laplace, Biot, Mathieu, Bouvard, Humboldt et beaucoup d'autres savants illustres à mieux comprendre notre planète. Ce fut surtout avec Humboldt qu'Arago a collaboré pour analyser ces données. Dans ses notices de l'Annuaire du BdL, et dans *l'Astronomie Populaire*, sa grande œuvre posthume, Arago a développé quelques aspects particuliers sur la physique du globe.



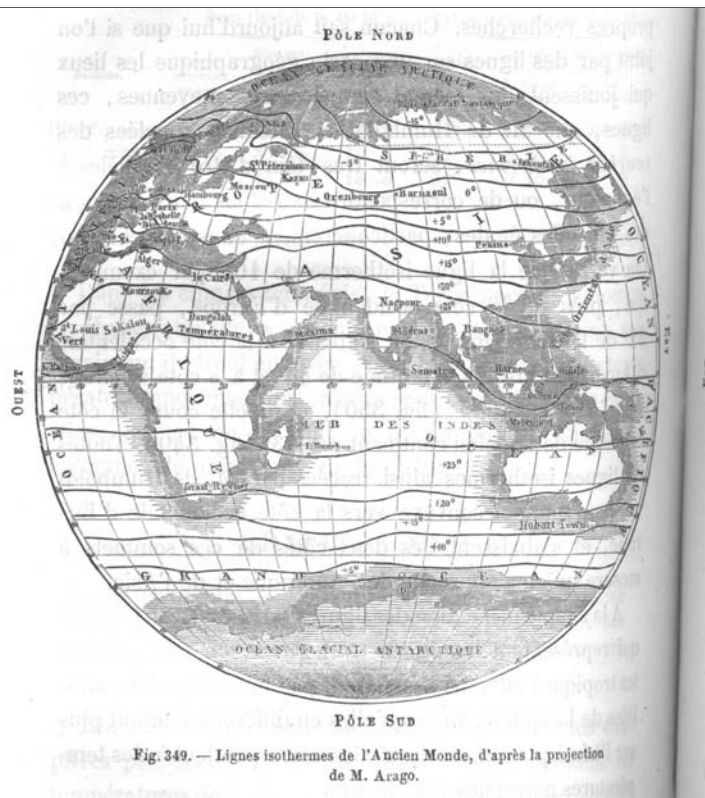
**Humboldt dans son bureau de Berlin (1845). (Bibl. des Arts décoratifs)**

### Alexander Von Humboldt dans son cabinet de travail à Berlin

La commission de savants analysait toutes ses données, et effectuait un rapport à l'Institut. Au cours des années d'activité d'Arago à l'Académie, de nombreux voyages ont été ainsi organisés, il a ainsi contribué avec Laplace, Biot, Mathieu, Bouvard, Humboldt et beaucoup d'autres savants illustres à mieux comprendre notre planète. Ce fut surtout avec Humboldt qu'Arago a collaboré pour analyser ces données. Dans ses notices de l'Annuaire du BdL, et dans *l'Astronomie Populaire*, sa grande œuvre posthume, Arago a développé quelques aspects particuliers sur la physique du globe.



# Les Saisons et le Climat



Les travaux en géophysique d'Arago ont plus particulièrement porté sur l'analyse des saisons et du climat sur la planète. Muni des données recueillies par les marins, il a constitué différentes cartes montrant les courbes de la température moyenne sur le Globe. De même il a étudié les courbes de température des différentes mers, selon la latitude.

Toujours sur les mers, Arago a réalisé des études précises sur les courants marins et sur les niveaux des mers.

Muni de ces études, Arago brossa dans *l'Astronomie Populaire* un tableau général des Saisons et des Climats. Il tenta de répondre à des questions très originales, telles que *le déluge a-t-il été dû à la chute d'une comète ? Les travaux des hommes peuvent-ils modifier le climat d'un lieu donné ? Les climats ont-ils été intervertis par des bouleversements récents ?* » Ou encore *les comètes peuvent-elles modifier sensiblement le cours des saisons ?* »

## Température vers l'intérieur



Joseph Fourier (1768-1830)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Fourier](http://fr.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier)

Joseph Fourier, dans son célèbre traité sur la chaleur, a discuté le problème de l'uniformisation des températures vers le centre de la Terre. Les mesures de gradients de température étaient nécessaires pour approfondir la question. Les physiciens utilisaient pour leur modèle les valeurs déterminées à partir des mines les plus profondes de l'époque.

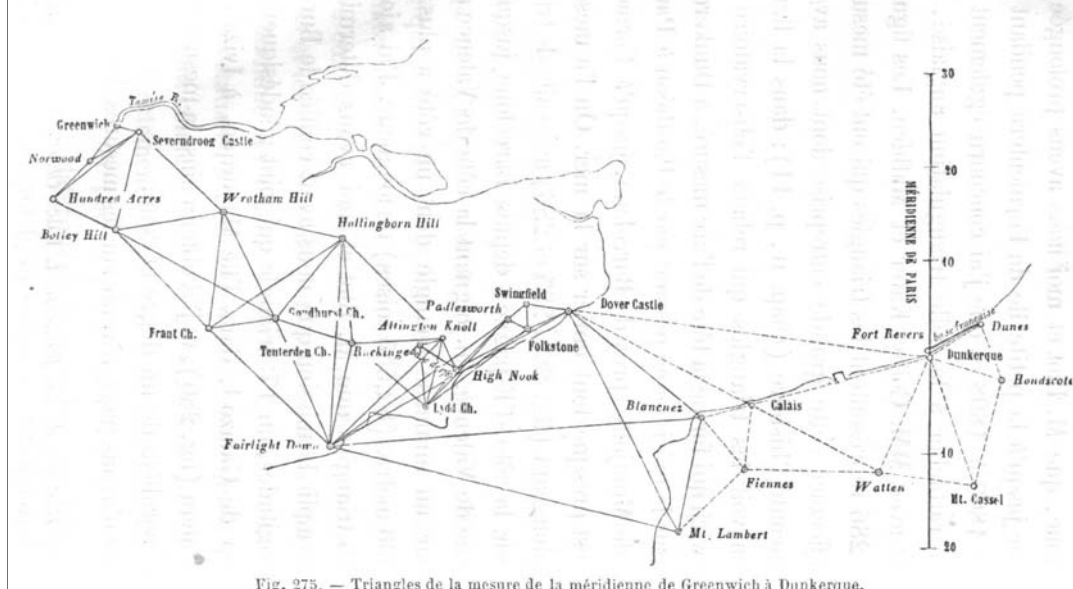
Comme nous le verrons plus loin, sur l'initiative d'Arago la ville de Paris fit creuser un puits à Grenelle pour alimenter en eau ce quartier populaire de Paris. Le creusement allait prendre huit années (1835-1843) au cours desquelles Arago en profita pour effectuer des mesures précises de température vers l'intérieur, pour cela il a dû modifier un thermomètre à maxima. Il obtint une valeur du gradient de température en accord avec celle qu'il avait déterminée à partir des caves de l'Observatoire de Paris, soit un degré pour 30m de décroissance. Ce qui conduisait à admettre une source d'énergie interne.

# Le Géomètre

Nous avons vu le jeune Arago à l'aventure, d'abord avec Biot, puis avec Berthémie, dans le cadre de l'extension de la méridienne. Cette activité de géomètre a dû être prolongée à plusieurs reprises, pour le raccordement des mesures géodésiques avec les Anglais ou pour des études comparatives de détermination d'un degré terrestre.

Pour réaliser leurs mesures, les jeunes savants avaient un cercle répétiteur de Borda dont ils avaient modifié quelques éléments afin d'en améliorer la précision. Avec cet instrument on visait deux directions simultanément a et b, avec deux lunettes A et B. A était mise à l'origine du cercle. Après la visée de a avec A et de b avec B, la mesure de la position de B donnait l'angle entre les deux directions. On faisait tourner le cercle pour mettre A dans la direction de B. Le cercle étant fixé, on déplaçait A, et on pointait a. Puis b avec B. On tournait le cercle qui portait les lunettes pour ramener A dans la direction b. La mesure obtenue correspondait maintenant à deux fois l'angle cherché. En faisant plusieurs dizaines de mesures, on obtenait donc un angle beaucoup plus grand, ce qui permettait de réduire les erreurs de mesures.

## Raccordement avec la triangulation anglaise



Les mesures de Biot et d'Arago permirent non seulement de préciser la longueur d'un arc de méridien, mais surtout d'obtenir une mesure de l'aplatissement de la Terre. En 1821, Arago participa au raccordement des mesures françaises à triangulation anglaise avec Mathieu, et les astronomes anglais Colby et Kater.

Dans *l'Astronomie Populaire*, Arago effectua une comparaison de toutes les mesures, aboutissant à la valeur de  $1/299,15$  pour l'aplatissement. Cette comparaison montra aussi que la longueur d'un arc dépendait aussi du méridien considéré, c'est à dire de la longitude. Le rêve des fondateurs du système métrique n'avait pas été validé. Il a fallu, ultérieurement, redéfinir le mètre autrement pour obtenir une unité plus universelle. Demain peut-être, en raison de l'augmentation de la précision des mesures et de nos connaissances, il faudra encore modifier la définition du mètre. Mais les variations ne sont pas perceptibles dans la vie courante, et les écoliers apprendront encore longtemps que le mètre est le dix millionième du quart du méridien terrestre.

# Utilisation du télégraphe électrique pour la détermination des longitudes

Pour déterminer les longitudes, Arago proposa l'utilisation du télégraphe électrique, dès sa mise en service. Une communication fut établie entre l'Observatoire de Paris et celui de Greenwich. Grâce à ce progrès, la géodésie allait pouvoir avancer à grand pas. Mais, par conséquent, progressivement le rôle des Astronomes allait aussi se restreindre comme une peau de chagrin. En effet, ils étaient attachés à un bureau dont la fonction était de déterminer les longitudes. Si la voie astronomique devenait dépassée, une partie de leurs prérogatives disparaissait. En ce sens, le détachement de l'Observatoire de Paris du BdL obtenu par Leverrier s'inscrivait dans une nouvelle perspective pour l'Astronomie, observer les astres pour mieux comprendre leur nature, plutôt que pour la simple aide à la cartographie et à la navigation.