

L'histoire de la vitesse de la lumière

Robert Garnier, observatoire de Lyon
avec la complicité de Georges Paturel

Le deuxième épisode de cette histoire est entièrement consacré à Arago. Physicien, astronome et homme d'état républicain, Arago est le type même du savant du XIX^{es}. Non seulement son oeuvre scientifique est considérable mais il s'attache à encourager les jeunes savants et à "rendre la philosophie populaire" en effectuant un admirable travail de vulgarisation.

Ses qualités d'expérimentateur apparaissent particulièrement dans cette histoire puisqu'il propose une expérience (qui sera réalisée par Foucault) consistant à comparer les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau.

4 - Arago souhaite connaître la vitesse de la lumière avec précision.

Le contexte.

Pendant plus d'un siècle, de 1728 à 1849, la vitesse de la lumière reste une curiosité scientifique en ce sens que la connaissance de sa valeur ne contribue en rien à l'explosion de résultats scientifiques qui caractérise cette époque. La science à la mode c'est l'Electricité et plus tard l'Electromagnétisme. Bien sûr, l'Optique n'est pas en reste mais le grand débat est alors celui qui oppose les partisans de la théorie corpusculaire aux tenants de la théorie ondulatoire et qui s'achèvera par le triomphe de ces derniers. C'est l'époque où les physiciens français qui tiennent le haut du pavé ont pour nom André-Marie Ampère, Pierre-Simon de Laplace, Augustin Fresnel, Jean-Baptiste Biot ou Louis-Joseph Gay-Lussac. La vitesse de la lumière fait bande à part et reste un peu comme un sous-produit des mesures astronomiques. Pour que les choses commencent à bouger, il faudra attendre 1843 année où Dominique-François-Jean Arago reçoit la charge de Directeur de l'Observatoire de Paris.

L'homme, sa vie, son oeuvre.

Fascinante personnalité que celle de François Arago (1786-1853) reçu premier à l'Ecole Polytechnique à l'âge de dix-sept ans après des études d'autodidacte. Il n'a pas encore terminé sa seconde année d'étude qu'il est, sur recommandation de Laplace, détaché au Bureau des Longitudes. Sur ces entrefaites, Méchain étant décédé, Poisson délègue Biot et Arago en Espagne afin d'y poursuivre les triangulations relatives à la mesure de la longueur de l'arc du méridien terrestre. Ils effectuent les relevés dans la région de Valence puis, Biot ayant été rappelé en France, Arago les poursuit seul à partir de janvier 1808 dans les îles de Majorque et de Formentera. Là-dessus, la guerre éclate entre la France et l'Espagne. Accusé d'espionnage, il est enfermé dans une forteresse de Majorque d'où il parvient à s'évader et à gagner clandestinement Alger. Dans cette ville il trouve à s'embarquer pour Marseille, mais les corsaires espagnols veillent et le navire qui le transporte est arraisonné.

Cette fois Arago fait connaissance avec le dur régime des pontons. Le 28 novembre 1808, il est relâché sur ordre du gouvernement espagnol.

Nouvel embarquement pour Marseille, mais cette fois-ci c'est le mistral qui oblige Arago à faire un crochet involontaire par le port barbaresque de Bougie. Il est transféré à Alger au terme d'un voyage au cours duquel il a failli mourir. Enfin en juin 1809, il parvient à s'embarquer pour Marseille où il finit par aborder le 2 juillet non sans rapporter avec lui les précieuses mesures concernant les triangulations effectuées avant que ne commencent ses tribulations.

Deux mois plus tard, le 18 septembre 1809, en dépit de son jeune âge (il est âgé de 23 ans) Arago est élu membre de l'Académie des Sciences, non comme récompense de ses mésaventures hispano-africaines, mais comme une juste reconnaissance des signalés services qu'il a déjà rendus à la Science. Il s'est, dès cette époque, distingué aussi bien par ses travaux de physicien que par ses talents d'astronome (libration de la Lune, calcul des orbites cométaires, tables de réfraction, triangulations prolongeant jusqu'à l'île de Formentera la mesure de l'arc de méridien).

Pour couronner le tout, à la fin de cette année 1809, Arago est nommé astronome à l'Observatoire de Paris, nomination assortie de la rarissime autorisation d'y résider. En 1830 il devient secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences et se consacre alors à une analyse méticuleuse des travaux présentés à l'Académie ainsi qu'à la rédaction de notices biographiques publiées dans «l'Annuaire du Bureau des Longitudes». Ces notices apportent une contribution essentielle à l'histoire des sciences et des grandes découvertes ayant la particularité de faire le point de tout ce qui a été fait sur la question jusqu'au savant dont il présente les travaux. C'est en 1843 qu'il accède à la direction de l'Observatoire de Paris dont il modernise les moyens d'observation tout en continuant un enseignement popularisant l'astronomie auprès du «grand public» ce qui fait de lui, selon le mot de l'Amiral Mouchez, «le plus grand vulgarisateur de son siècle». Élu député des Pyrénées Orientales lors de l'avènement de la Seconde République, il siège à l'extrême gauche avant de devenir ministre de la Marine

et de la Guerre. Après avoir été l'instigateur de l'abolition de l'esclavage dans les colonies françaises, il refuse de prêter serment au gouvernement issu du coup d'état du 2 décembre 1852. Napoléon III, l'ayant dispensé de cette prestation, Arago conserve sa charge de Directeur de l'Observatoire jusqu'à sa mort qui survient l'année suivante.

Arago et la vitesse de la lumière.

En 1806, alors qu'il vient juste de sortir de l'École Polytechnique, Arago, à la suggestion de Laplace, est amené à s'intéresser à la vitesse de la lumière. Le problème qui lui est soumis ne concerne pas la grandeur de cette vitesse mais sa constance dans un milieu donné. En d'autres termes, la lumière émise par un objet terrestre, par le Soleil ou par un astre quelconque se propage-t-elle à la même vitesse ? En ce qui concerne les étoiles, le fait que le grand axe de l'ellipse d'aberration ait une grandeur angulaire indépendante de l'étoile observée apporte indiscutablement de l'eau au moulin des tenants de la constance de cette vitesse.

La solution du problème soumis à la sagacité d'Arago présente en réalité un intérêt primordial en cette aube du dix-neuvième siècle où, concernant la nature de la lumière, la communauté scientifique est plus que jamais partagée entre les «newtoniens» qui, comme Laplace, Biot ou Brewster se font les défenseurs acharnés de la théorie de l'émission et ceux qui à l'instar de Young ou de Fresnel préfèrent le modèle ondulatoire hérité de Huygens. Ce dilemme se voit réactualisé en 1807 lorsqu'il s'agit d'expliquer le phénomène de la biréfringence des cristaux de spath d'Islande découvert en 1669 par Erasmus Bartholin (1625-1698). Pour les «newtoniens» il s'agit là d'une anomalie inexplicable, déconcertante mais bien réelle, de la nature. Lorsqu'à l'instigation de Laplace lui-même, Etienne Malus (1775-1812) aborde le problème à son tour, il commence par découvrir la polarisation de la lumière (1808), phénomène qui semble porter le coup de grâce au modèle ondulatoire à une époque où l'on imagine pas que les ondes lumineuses, si elles existent, puissent ne pas être longitudinales (analogie avec les ondes sonores). Si

les ondes lumineuses sont longitudinales, comment expliquer en effet que «les rayons lumineux puissent avoir des côtés» ? L'idée que les ondes lumineuses puissent être transverses ne semble pas avoir retenu l'attention des physiciens d'alors.

Si les «newtoniens» ont raison, les rayons lumineux sont constitués d'un flot de particules, chacune d'elles ayant une masse faible certes, mais non nulle et de tels corpuscules sont nécessairement soumis aux lois de la mécanique. C'est ainsi que ceux émis par les étoiles plus massives que le Soleil doivent se déplacer plus lentement que ceux provenant de ce dernier. D'autre part, la vitesse des particules lumineuses doit varier suivant que l'étoile s'approche où s'éloigne de la Terre. Mais, si la vitesse de la lumière émise par les étoiles diffère de l'une à l'autre, comment expliquer qu'aux erreurs de mesure près, l'aberration soit identique pour toutes ? Ce qui est certain, c'est qu'en cette première décennie du dix-neuvième siècle la communauté scientifique est convaincue qu'il y a là un problème et qu'on se trouve à une croisée de chemins.

Constance de la vitesse de la lumière dans un milieu homogène.

C'est alors que Laplace qui vient de découvrir les talents du jeune Arago qui achève Polytechnique, propose à ce dernier d'aborder le problème de la constance de la vitesse de la lumière dans un milieu homogène (1806). En d'autres termes : Est-il possible de comparer directement la vitesse de la lumière émise par les étoiles, le Soleil ou les objets terrestres ? On sait alors que l'indice de réfraction d'un prisme de verre est fonction du rapport de la vitesse de la lumière dans l'air et dans le verre, les deux théories en présence ne s'opposant sur ce point particulier que sur la valeur de ce rapport. Si donc la vitesse de la lumière émise par des corps célestes ou terrestres diffère de l'un à l'autre, les images de ces objets observées à travers un même prisme sont nécessairement déviées différemment. Arago utilise un télescope muni d'un prisme amovible et montre que toutes les images observées sont identiquement décalées.

Il en conclut qu'à deux dix-millièmes près la vitesse de la lumière est constante. C'est cette démonstration de la constance de la vitesse de la lumière qui vaut à Arago son élection à l'Académie des Sciences le 18 septembre 1809, à l'âge de 23 ans. quarante-sept suffrages sur cinquante-deux s'étant portés sur son nom, nom qui pendant près d'un demi-siècle va se trouver lié à l'aventure de la physique de la lumière.

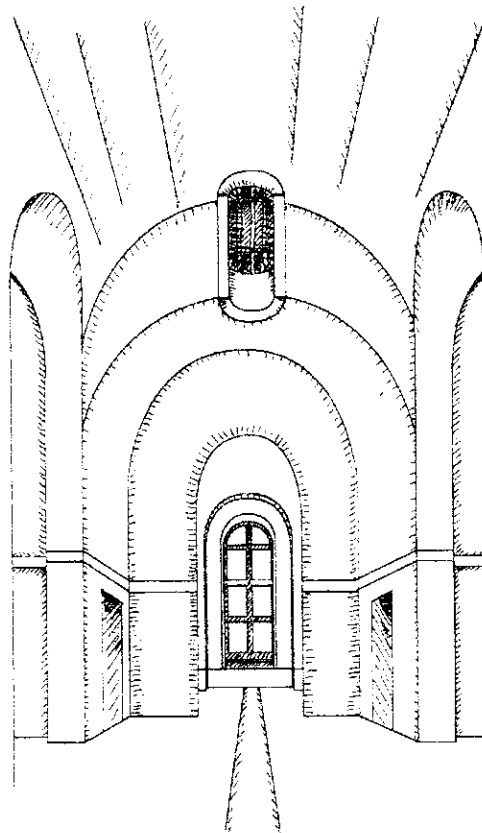
L'éther.

S'il y a quelqu'un que le résultat expérimental d'Arago est bien propre à réjouir, c'est Thomas Young (1773-1829) qui depuis ses premières expériences sur les interférences lumineuses apparaît comme un inconditionnel de la théorie ondulatoire. N'a-t-il pas écrit en 1800 que l'uniformité du mouvement de la lumière dans un milieu homogène, difficile à interpréter dans le modèle émissif, s'intègre au contraire tout à fait dans la théorie ondulatoire puisqu'il est à cette époque bien connu que dans un milieu élastique toutes les vibrations sont transmises à la même vitesse. Cette théorie connaît un essor considérable au cours des deux décennies suivantes sous l'impulsion d'Augustin Fresnel (1788-1827). Dès lors tous les phénomènes lumineux connus reçoivent une explication claire et logique à un détail près. Les ondes lumineuses se propagent à travers le vide intersidéral où, par définition, ne se trouve aucune matière. Comment donc imaginer que ce vide puisse être rempli de «quelque» chose qui soit suffisamment rigide pour rendre compte de la grande valeur de la vitesse de la lumière, parfaitement élastique pour expliquer que la lumière puisse se propager sur des distances considérables et cependant assez ténu pour être vide ? Fresnel s'en tire en postulant l'existence d'un tel milieu aux propriétés pourtant si contradictoires : l'éther est né et pendant près d'un siècle, il n'a pas fini de faire parler de lui.

L'idée d'Arago.

L'année 1838 marque un tournant important dans l'évolution du problème posé par la détermination de la vitesse de la lumière. A cette époque le modèle ondulatoire de Fresnel paraît

tellement plus efficace que la théorie de l'émission qu'il est en passe de s'imposer définitivement. Il n'y a plus guère que quelques irréductibles, au nombre desquels Biot, Poisson et Brewster, pour croire contre vents et marées que la lumière est de nature corpusculaire. Il est cependant exact que les deux modèles en compétition expliquent la quasi totalité des phénomènes observés mais la théorie de Fresnel a pour elle l'incontestable avantage - et c'est fondamental



dans le domaine scientifique - de l'élégance, le seul point épineux subsistant étant celui de la nature de l'éther. Il est important de remarquer que jusque-là on n'a jamais imaginé de protocole expérimental qui permette de trancher sans appel entre les deux modèles.

Et c'est là qu'intervient Arago. Son idée est de comparer expérimentalement les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau. Si la lumière se propage plus vite dans l'eau que dans l'air, c'est le modèle newtonien qui est correct. Si c'est l'inverse qui est observé, alors c'est Fresnel qui a raison et il n'y a plus de discussion possible. L'idée d'Arago, pour simple qu'elle nous apparaisse aujourd'hui, présente un côté révolutionnaire. En effet jusqu'ici, la mesure de la vitesse de la lumière était

une affaire d'astronomes. Mais pour faire la comparaison suggérée par Arago, il devient nécessaire d'être en mesure de la déterminer au laboratoire. Elle devient désormais affaire de physiciens et du même coup perd son caractère de curiosité scientifique.

Le principe.

Dans son principe l'expérience imaginée par Arago est très simple. Un signal lumineux est divisé en deux : une partie traverse un tube rempli d'eau tandis que l'autre partie parcourt une distance identique dans l'air. Si l'on est en mesure de déterminer lequel des deux signaux est le plus rapide, le problème est résolu. La difficulté est évidente : comment déterminer avec une précision suffisante des temps de parcours aussi courts ?

Il semble que ce soit le physicien anglais Thomas Young qui le premier s'intéresse à la mesure des temps très courts, de l'ordre du millième de seconde. Il construit un «chronomètre» dans lequel un tambour d'axe vertical, mû par la chute d'un poids tourne en descendant. La surface du tambour est recouverte d'un papier sur lequel un stylet fixe trace une hélice circulaire droite. Pour déterminer la durée d'un phénomène rapide, il suffit de coupler le dispositif qui le produit au stylet et de traduire en temps le graphe enregistré. Les performances de l'appareil réalisé par Young ne

permettent pas de mesurer des temps suffisamment courts pour qu'il soit utilisable dans une expérience telle que celle imaginée par Arago. Cependant l'idée de Young est extrêmement intéressante en ce sens qu'elle établit la possibilité de mesurer la durée d'un phénomène très bref à condition de coupler un mouvement très rapide lié à ce phénomène avec un autre, plus lent mais dont la vitesse est connue. C'est en somme l'apparition de ce qu'aujourd'hui nous appelons la technique du balayage qui a reçu une application bien connue dans l'oscillographe cathodique. A partir de 1831, le physicien français Arthur Morin (1795-1880) imagine un certain nombre de machines destinées à l'étude des mouvements très rapides comme celui de la

rien français Arthur Morin (1795-1880) imagine un certain nombre de machines destinées à l'étude des mouvements très rapides comme celui de la chute des corps. Il obtient une précision analogue à celle atteinte par Young, mais il convient de souligner que les travaux de Morin sont totalement indépendants de ceux de Young.

Les années 1840 voient, à l'instigation des artilleurs, se développer des dispositifs enregistreurs destinés à l'analyse des phénomènes rapides. On a déjà gagné un ordre de grandeur par rapport à Young et désormais on sait mesurer des durées n'excédant pas le dix-millième de seconde mais la performance est encore insuffisante pour qu'il soit possible de mettre en oeuvre la suggestion d'Arago. A ces innovations sont attachés des noms bien connus de physiciens ou d'ingénieurs au nombre desquels figurent en bonne place ceux de Wheatstone, de Pouillet et de Bréguet. En ce qui concerne notre histoire, c'est incontestablement au physicien anglais sir Charles Wheatstone (1802-1875) que revient la palme. Il ne semble pas qu'il se soit jamais intéressé à la vitesse de la lumière, ses goûts le portant plutôt vers l'étude des phénomènes électriques et de leurs applications industrielles. Ce qui intéresse Wheatstone, c'est de connaître la vitesse de l'électricité à une époque où la propagation des charges électriques dans le vide ou dans les conducteurs est encore bien mystérieuse. Son problème consiste à déterminer la vitesse du déplacement des charges lors de l'éclatement d'une étincelle électrique. Reprenant les idées de son compatriote Young, il combine le mouvement de l'étincelle avec un autre de direction et de vitesse connues et opte pour une rotation uniforme.

Dans une première tentative, Wheatstone s'inspire directement du dispositif de Young et c'est un échec. L'étincelle électrique se déplace beaucoup trop rapidement pour qu'il obtienne un résultat significatif. Il a alors l'éclair de génie ; il décide de faire tourner non plus le générateur d'étincelles, mais l'image de l'étincelle qu'il rend fixe grâce à la persistance rétinienne. A la rotation relativement lente d'un lourd dispositif expérimental se trouve substituée celle d'un petit miroir plan la-

quelle peut être infiniment plus rapide. En introduisant sa technique dite du «miroir tournant», Wheatstone fait effectuer à la mesure des intervalles de temps très courts un bond considérable, suffisant en tout cas pour rendre possible la matérialisation du rêve d'Arago. En effet, utilisant un miroir tournant, Wheatstone parvient à mesurer la vitesse de propagation d'une onde de tension dans un conducteur métallique et trouve une vitesse de 461 000 kilomètres par seconde. Évidemment nous savons aujourd'hui que ce résultat est erroné, mais l'expérience de Wheatstone a l'incontestable mérite de montrer que la mesure de la vitesse de la lumière au laboratoire n'est plus une chimère. Désormais la balle est de nouveau dans le camp d'Arago.

Les difficultés.

Arago dispose maintenant de tous les ingrédients qui lui sont nécessaires pour entreprendre la réalisation de son expérience destinée à comparer les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau. La technique du miroir tournant est au point, on sait faire tourner un miroir plan à grande vitesse et produire des impulsions lumineuses très brèves. Grâce au miroir tournant, les faisceaux transmis respectivement par la colonne d'eau et par l'air seront réfléchis dans deux directions différentes et donneront donc du signal lumineux deux images distinctes. De la position relative de ces images, il sera possible de savoir instantanément si la lumière se propage plus vite dans l'air ou dans l'eau.

Arago se propose de rendre l'expérience encore plus probante en mesurant l'écart angulaire des deux images au moyen d'une lunette. Et c'est là que commencent les difficultés. Pour améliorer la séparation angulaire des images, il a le choix entre deux solutions. La première consisterait à augmenter la vitesse de rotation du miroir, mais alors se pose un problème de roulements, leur usure rapide ne garantissant pas une rotation uniforme. La seconde serait d'augmenter la longueur de la colonne d'eau ce qui aurait pour effet d'accroître l'intervalle de temps séparant l'émergence des deux signaux. Cependant, en dépit de sa transparence, l'eau possède un certain coefficient d'absorption. Il est donc impensable de pouvoir allonger la colonne d'eau au-delà d'une

certaine limite sans trop affaiblir le signal émergeant et du même coup rendre l'image correspondante tout simplement inobservable.

Cette dernière difficulté, Arago pense la contourner en remplaçant l'eau par un liquide plus réfringent et donc dans lequel la lumière se propage soit plus lentement, soit plus rapidement que dans l'eau et il songe à utiliser le sulfure de carbone. Il pense d'autre part augmenter l'écart angulaire des images en faisant appel à un dispositif comportant non plus un seul miroir tournant mais un ensemble de trois miroirs. Mais là encore l'affaiblissement des images résultant de la multiplicité des réflexions se révèle inacceptable.

En 1850, il résumera toutes ses déconvenues devant ses collègues de l'Académie des Sciences en disant n'avoir trouvé aucun mécanisme susceptible d'entraîner une rotation suffisamment rapide du miroir. Bref, les années passent et l'expérience qui doit trancher entre les deux théories reste à l'état de projet.

Ce n'est peut-être pas que les idées fassent défaut à Arago. Dix années se sont en effet écoulées depuis ses premières cogitations ; on approche des années 1848, sa vue a considérablement baissé et ses activités d'homme politique et de vulgarisateur scientifique accaparent une part toujours plus importante de son temps. Il pense venu le moment de passer la main à plus jeune que lui. Les continuateurs sont là, à l'Observatoire de Paris et c'est lui, Arago, qui leur en a depuis quelques années déjà, ouvert les portes. Ils ont pour noms Hippolyte Fizeau et Léon Foucault.

Suite et fin dans le n°85

Bibliographie

Les constructeurs d'instruments scientifiques en France au XIX^e siècle, Jacques Payen, Archives internationales d'histoire des sciences, juin 1986, vol 36.

Histoire de ma jeunesse, par François Arago, Christian Bourgeois 1986.

Arago, par Maurice Daumas (1943). Réédition par Belin en 1987, à l'occasion du bicentenaire de la naissance d'Arago dans la collection "un savant, une époque". ■