

Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre

Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de météorologie dynamique
Université Pierre-et-Marie-Curie
& Centre national de la recherche scientifique
4, place Jussieu - 75752 Paris Cedex 05
dufresne@lmd.jussieu.fr

Résumé

Joseph Fourier est bien connu pour ses travaux mathématiques et pour ceux sur la diffusion de la chaleur. On parle de séries de Fourier, de coefficients de Fourier, d'intégrales de Fourier, etc. Son œuvre probablement la plus connue est la « Théorie analytique de la chaleur ». Ici nous présentons l'importante contribution de Fourier aux sciences de l'univers à travers l'analyse de son « Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires ».

Abstract

Jean-Baptiste Joseph Fourier
and the discovery
of the greenhouse effect

Joseph Fourier is well known for his mathematical studies and for his work on heat diffusion. Fourier series, Fourier coefficients, Fourier integrals, etc. are common expressions. Fourier's best known work is probably the «Analytical theory of heat». Here we present Fourier's important contribution to the Earth and space sciences by analysing his «Memoir on the temperature of the Earth and planetary spaces».

Couverture du recueil des œuvres
de Fourier paru en 1890.
(© Bibliothèque nationale de France)

Le mémoire de Fourier

« *La question des températures terrestres, l'une des plus importantes et des plus difficiles de toute la Philosophie naturelle, se compose d'éléments assez divers qui doivent être considérés sous un point de vue général. J'ai pensé qu'il serait utile de réunir dans un seul écrit les conséquences principales de cette théorie ; les détails analytiques que l'on omet ici se trouvent pour la plupart dans les Ouvrages que j'ai déjà publiés. J'ai désiré surtout présenter aux physiciens, dans un tableau peu étendu, l'ensemble des phénomènes et les rapports mathématiques qu'ils ont entre eux* » (Fourier, 1890). Dans l'introduction de



Joseph Fourier (1768-1830).
(© Archives de l'Académie des sciences)

son « Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires », publié en 1824⁽¹⁾ (Fourier, 1824), Joseph Fourier présente clairement l'ambition et le principal apport de son mémoire : poser les bases scientifiques de l'étude de la température de la Terre. Ce mémoire est effectivement considéré aujourd'hui comme portant les bases de la compréhension de l'équilibre thermique des atmosphères planétaires et comme ayant situé « *le problème de la température de la Terre dans son contexte cosmologique* » (Grinevald, 1992).

(1) Ce mémoire a d'abord été publié en 1824 dans les *Annales de Chimie et de Physique*, puis en 1827, avec de légères modifications, dans les *Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France* (Fourier, 1827). Cette version a ensuite été publiée en 1890 dans un recueil des œuvres de Fourier (Fourier, 1890) ; les citations et la pagination se rapportent à ce dernier recueil.



William Herschel (1738-1822), né en Allemagne, découvreur du rayonnement infrarouge. (Photographie parue dans *Famous Men of Science* de Bolton, Sarah K, 1889, © 2004 by David M. MacMillan)



Le contenu de ce mémoire a toutefois quelque chose de paradoxal : la partie la plus détaillée et la plus aboutie porte sur la compréhension et la quantification de la diffusion de la chaleur à l'intérieur du globe terrestre. Fourier utilise l'énorme travail qu'il a fait sur la diffusion de la chaleur dans les solides et sur la résolution mathématique de ce problème (travaux qui l'ont notamment amené à développer la fameuse transformée de Fourier) et en conclut que les échanges de chaleur avec l'intérieur de la Terre jouent un rôle... négligeable sur la température d'équilibre de la surface de la Terre. Ce mémoire n'aurait ainsi qu'un intérêt limité si Fourier ne se servait de ces résultats pour en déduire que les phénomènes clés sont l'absorption du rayonnement solaire et les échanges par rayonnement infrarouge avec « l'espace planétaire ». Le rayonnement infrarouge avait été découvert par Sir William (alias Friedrich) Herschel environ vingt-cinq ans auparavant, il était encore très mal connu et appelé **chaleur obscure**. La présentation par Fourier des échanges radiatifs infrarouges est très qualitative, très courte (environ deux pages de son mémoire long de vingt-huit pages), ne possède pas le degré d'achèvement de ses travaux sur la diffusion de la chaleur, mais introduit des mécanismes essentiels, tel l'effet de serre, qui seront ensuite des sujets de recherche pendant plusieurs décennies, certains étant toujours d'actualité.

La température d'une planète

Si Fourier est souvent considéré comme l'un des scientifiques à l'origine de la découverte de l'effet de serre (Bard, 2004 ; Pierrehumbert, 2004), expression que lui-même n'utilise pas et qui sera introduite plus tard, c'est que sa présentation, même qualitative, montre qu'il avait bien analysé les principes essentiels de cet effet. Tout d'abord, Fourier explique que le champ de température est déterminé par le bilan des flux de chaleur. Il l'a formulé mathématiquement dans le cas de la diffusion de la chaleur dans un solide, mais a généralisé sa validité aux autres modes de transfert de chaleur. « On peut conce-

voir que l'état de la masse a varié continuellement à mesure qu'elle recevait la chaleur sortie du foyer. Cet état variable des températures intérieures s'est altéré par degrés, et s'est approché de plus en plus d'un état final qui n'est sujet à aucun changement [...]. L'état final de la masse, dont la chaleur a pénétré toutes les parties, est exactement comparable à celui d'un vase qui reçoit, par des ouvertures supérieures, le liquide que lui fournit une source constante et en laisse échapper une quantité précisément égale par une ou plusieurs issues. »⁽¹⁾ La notion de bilan d'énergie est aujourd'hui un principe fondamental. Par exemple, la température de surface d'une planète dépend directement du bilan d'énergie en surface : elle absorbe une certaine puissance, provenant éventuellement de plusieurs sources, et se réchauffe jusqu'à ce que la puissance perdue soit égale à la puissance absorbée.

Fourier a également identifié les différents modes de transfert d'énergie entre la Terre et son environnement. « La chaleur du globe terrestre dérive de trois sources qu'il est d'abord nécessaire de distinguer :

- la Terre est échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats ;
- elle participe à la température commune des espaces planétaires, étant exposée à l'irradiation des astres innombrables qui environnent de toutes parts le système solaire ;

Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799), physicien suisse. Il inventa la « boîte chaude » en 1767. Il est considéré comme le précurseur du capteur solaire plan. (© Bibliothèque publique et universitaire, Neuchâtel)

– la Terre a conservé dans l'intérieur de sa masse une partie de la chaleur primitive qu'elle contenait lorsque les planètes ont été formées. »⁽²⁾

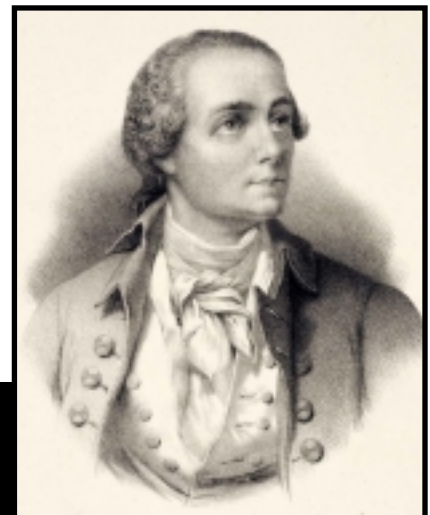
L'effet de serre

Pour les échanges par rayonnement, Fourier fait l'analogie entre ce qui se passe dans l'atmosphère et ce que l'on peut observer dans les expériences réalisées par Horace-Bénédict de Saussure (de Saussure, 1779). Le dispositif expérimental utilisé consiste en une boîte isolée thermiquement, avec un fond noir et surmontée d'un triple vitrage. C'était le précurseur du capteur solaire thermique, utilisé par exemple pour produire de l'eau chaude sanitaire. De Saussure observa que la température à l'intérieur de la boîte était beaucoup plus élevée qu'à l'extérieur et Fourier en donna une interprétation : « La théorie de cet instrument est facile à concevoir. Il suffit de remarquer :

- que la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est point dissipée immédiatement par le renouvellement de l'air ;
- que la chaleur émanée du Soleil a des propriétés différentes de celles de la chaleur obscure. Les rayons de cet astre se transmettent en assez grande partie au-delà des verres dans toutes les capacités et jusqu'au fond de la boîte. Ils échauffent l'air et les parois qui le contiennent : alors leur chaleur ainsi communiquée cesse d'être lumineuse ; elle ne conserve que les propriétés communes de la chaleur rayonnante obscure. Dans cet état, elle

(1) *ibid*, p. 102

(2) *ibid*, p. 97



Bibliothèque des sciences de l'université de Grenoble 1, qui porte le nom de Joseph Fourier. Ce dernier installa à Grenoble la faculté des sciences en 1811. (© Météo-France, D. Lecorps)

ne peut traverser librement les plans de verre qui couvrent le vase ; elle s'accumule de plus en plus dans une capacité enveloppée d'une matière très peu conductrice, et la température s'élève jusqu'à ce que la chaleur affluente soit exactement compensée par celle qui se dissipe. »⁽¹⁾

Fourier fait le parallèle entre les vitres de la boîte et l'atmosphère de la Terre : elles sont transparentes au rayonnement visible et opaques au rayonnement infrarouge. Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère et transporte de l'énergie jusqu'à la surface. Celle-ci absorbe une partie du rayonnement solaire, gagne de l'énergie qu'elle perd en émettant du rayonnement infrarouge. L'atmosphère absorbe ce rayonnement infrarouge, ce qui limite les pertes d'énergie vers l'espace. Il en déduit les conséquences pour la température d'équilibre des planètes : « C'est ainsi que la température est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure. »⁽²⁾

Ainsi Fourier a jeté les bases de ce qui sera plus tard appelé l'effet de serre. Certains aspects manquent, et notamment le fait que ce n'est pas directement l'absorption du rayonnement infrarouge qui réduit les pertes d'énergie vers l'espace, mais plutôt le fait que, si l'atmosphère absorbe du rayonnement infrarouge, elle en émet aussi, et c'est cette émission qui apporte un supplément d'énergie à la surface. Par ailleurs, Fourier néglige la convection, mais il estime que celle-ci ne devrait pas remettre en cause l'effet de serre lui-même. « La mobilité de l'air, qui se déplace rapidement dans tous les sens et qui s'élève lorsqu'il est échauffé, et le rayonnement de la chaleur obscure dans l'air diminuent l'intensité des effets qui auraient lieu sous une atmosphère transparente et solide, mais ne dénaturent point entièrement ces effets. »⁽³⁾ Cela est vrai dans le cas de l'atmosphère terrestre, mais pas dans celui d'une serre, ce qui est à l'origine des critiques de l'appellation « effet de serre ». Fourier perçoit bien l'aspect inachevé de son travail : « Il



est difficile de connaître jusqu'à quel point l'atmosphère influe sur la température moyenne du globe, et l'on cesse d'être guidé dans cet examen par une théorie mathématique régulière. »⁽⁴⁾ De nombreuses connaissances théoriques et données expérimentales manquaient encore à l'époque.

Les échanges de chaleur

La partie la plus longue du mémoire de Fourier porte sur les échanges de chaleur entre la surface et l'intérieur de la Terre. Cet aspect de son travail repose à la fois sur une formulation mathématique et sur des observations, ce qui permet à Fourier d'être quantitatif dans ses propos. À l'époque de Fourier, on pensait que la Terre, initialement très chaude, était en cours de refroidissement, et que cela influençait fortement la température à la surface de la Terre. Trouver le lien entre la température de surface et les échanges de chaleur avec le centre de la Terre était donc un problème scientifique important.

Fourier identifie deux sources de chaleur. L'une est le rayonnement solaire qui chauffe la surface, avec un cycle diurne et un cycle saisonnier. L'autre est le flux de chaleur géothermique qui vient du centre de la Terre. Fourier reconnaît que l'équation de la diffusion de la chaleur dans un solide est linéaire, et qu'il peut donc étudier séparément ces deux sources de chaleur et additionner ensuite leurs effets.

Pour les apports solaires en surface, Fourier note que le cycle saisonnier du flux de chaleur et de la température s'atténue quand on s'éloigne de la surface. « Les rayons de chaleur que le Soleil envoie incessamment au globe terrestre y produisent deux effets très distincts : l'un est périodique et s'accomplit tout entier dans l'enveloppe extérieure, l'autre est constant ; on l'observe dans les lieux profonds, par exemple à 30 m au-dessous de la surface. La température de ces lieux ne subit aucun changement sensible dans le cours de l'année, elle est fixe ; mais elle est très différente dans les différents climats : elle résulte de l'action perpétuelle des rayons solaires et de l'inégale exposition des parties de la surface, depuis l'équateur jusqu'aux pôles »⁽⁵⁾.

Pour le flux géothermique, il utilise le gradient vertical moyen observé près de la surface terrestre. Il note que cet accroissement de température est de 1 °C quand la profondeur augmente de 30 ou 40 mètres. Il en déduit que le flux de chaleur dû à ce gradient n'a qu'un impact très faible sur la température de surface. Ayant établi les équations de diffusion de la chaleur dans ses travaux antérieurs, il explique longuement et sous différentes formes que les flux et les températures en surface sont très peu dépendants des détails de ce qui se passe dans la sphère terrestre, et que la diffusion lisse tout.

(1) *ibid.*, p. 110

(2) *ibid.*, p. 111

(3) *ibid.*, p. 111

(4) *ibid.*, p. 110

(5) *ibid.*, p. 99

Le gradient de température à l'intérieur de l'océan est opposé à celui à l'intérieur de la Terre : dans l'océan, la température décroît lorsque la profondeur augmente. Pour montrer que cette observation n'est pas contradictoire avec l'existence de flux géothermiques, Fourier est amené à expliquer le principe du fonctionnement de la circulation thermohaline. Du fait de la convection, l'océan profond est alimenté par de l'eau dont la température est celle pour laquelle la densité de l'eau est maximale. « Lorsque la température des couches supérieures du liquide deviendra moindre que celle des parties inférieures, quoique surpassant de quelques degrés seulement la température de la glace fondante, la densité de ces couches supérieures augmentera ; elles descendront de plus en plus, et viendront occuper le fond des bassins qu'elles refroidiront par leur contact ; dans le même temps, les eaux plus échauffées et plus légères s'élèveront pour remplacer les eaux supérieures, et il s'établira dans les masses liquides des mouvements infiniment variés dont l'effet général sera de transporter la chaleur vers les régions élevées. »⁽¹⁾

Fourier sous-estime les transports de chaleur...

Fourier est conscient du fait que l'atmosphère et l'océan peuvent transporter de la chaleur de par leur mouvement. « Les liquides conduisent très difficilement la chaleur ; mais ils ont, comme les milieux aëriiformes, la propriété de la transporter rapidement dans certaines directions. C'est cette même propriété qui, se combinant avec la force centrifuge, déplace et mêle toutes les parties de l'atmosphère et celles de l'Océan ; elle y entretient des courants réguliers et immenses. »⁽²⁾ Mais il sous-estime la contribution de ces transports de chaleur et suppose qu'ils ont un effet négligeable sur la différence de température moyenne entre l'équateur et les pôles. « La mobilité des eaux et de l'air tend à modérer les effets de la chaleur et du froid ; elle rend la distribution plus uniforme ; mais il serait impossible que l'action de l'atmosphère suppléât à cette cause universelle qui entretient la température commune des espaces planétaires ; et, si cette cause n'existait point, on observerait, nonobstant l'action de

l'atmosphère et des mers, des différences énormes entre les températures des régions équatoriales et celle des pôles. »⁽³⁾

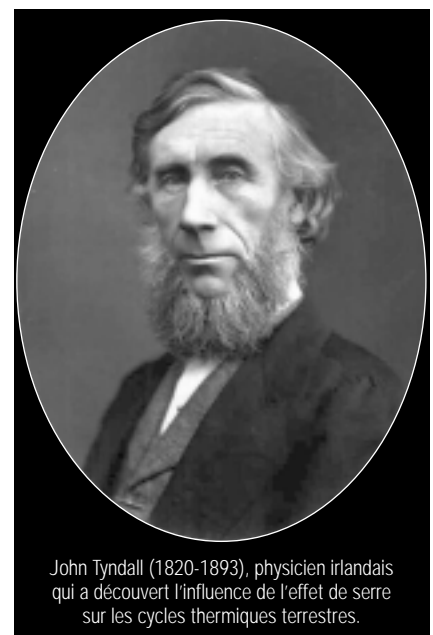
Fourier n'avait pas les moyens d'estimer ces transports de chaleur par l'atmosphère et l'océan. C'est seulement au début du XX^e siècle que les premières estimations du transport de chaleur ont pu être établies, et elles ne sont devenues fiables qu'à partir des années 1970 grâce à la mesure par satellite du bilan radiatif au sommet de l'atmosphère. Fourier n'imaginait pas que ce transport méridien de chaleur était si important : par exemple, à 30° de latitude nord ou sud, le transport de chaleur des basses vers les hautes latitudes est de 6.10^{15} W environ. Le transport total de chaleur est aujourd'hui bien estimé, mais la répartition entre la part de cette chaleur transportée par l'océan et celle transportée par l'atmosphère demeure encore incertaine, notamment aux hautes latitudes.

... et déduit une température de l'espace planétaire trop élevée

Les régions polaires ne reçoivent pas d'énergie solaire pendant plusieurs mois de l'année. Comme Fourier a montré que l'apport par les échanges de chaleur avec l'intérieur de la Terre est faible et comme il pense que les transports de chaleur par l'atmosphère et l'océan sont négligeables, il en déduit que l'espace planétaire doit avoir une température proche de celle des régions polaires en hiver. Le raisonnement est exact, mais le résultat est faux à cause des hypothèses erronées sur le transport méridien d'énergie. Fourier utilise des descriptions dramatiques pour imaginer un monde avec une température de l'espace planétaire plus faible. « Les régions polaires subiraient un froid immense, et le décroissement des températures depuis l'équateur jusqu'aux pôles serait incomparablement plus rapide et plus étendu que le décroissement observé. [...] L'intermittence des jours et des nuits produirait des effets subits et totalement différents de ceux que nous observons. La surface des corps serait exposée tout à coup, au commencement de la nuit, à un froid infiniment intense. Les corps animés et les végétaux ne résisteraient point à une action aussi

forte et aussi prompte, qui se reproduirait en sens contraire au lever du Soleil. »⁽⁴⁾ C'est John Tyndall (Tyndall, 1863 et 1887) qui comprendra plus tard que l'effet de serre est l'un des phénomènes qui réduisent l'amplitude du cycle diurne et du cycle saisonnier.

Fourier donne également une explication de cette température de l'espace planétaire et de sa valeur élevée. « Après avoir reconnu l'existence de cette température fondamentale de l'espace sans laquelle les effets de chaleur observés à la superficie du globe seraient inexplicables, nous ajouterons



John Tyndall (1820-1893), physicien irlandais qui a découvert l'influence de l'effet de serre sur les cycles thermiques terrestres.

que l'origine de ce phénomène est pour ainsi dire évidente. Il est dû au rayonnement de tous les corps de l'univers dont la lumière et la chaleur peuvent arriver jusqu'à nous. Les astres que nous apercevons à la vue simple, la multitude innombrable des astres télescopiques ou des corps obscurs qui remplissent l'univers, les atmosphères qui environnent ces corps immenses, la matière rare disséminée dans diverses parties de l'espace, concourent à former ces rayons qui pénètrent de toutes parts dans les régions planétaires. On ne peut concevoir qu'il existe un tel système de corps lumineux ou échauffés, sans admettre qu'un point quelconque de l'espace qui les contient acquiert une température déterminée. »⁽⁵⁾ L'explication est pertinente,

(1) *ibid.*, p. 118

(2) *ibid.*, p. 110

(3) *ibid.*, p. 109

(4) *ibid.*, p. 106-107

(5) *ibid.*, p. 107

mais l'ordre de grandeur n'y est pas : d'après les estimations actuelles, l'espace interstellaire émet un rayonnement correspondant à celui d'un corps noir à 3 K, et l'apport du rayonnement émis par les objets célestes proches est encore plus faible.

Finally, a zero temperature of space would, according to Fourier, make Earth too sensitive to a variation of the Earth-Sun distance, to a change in eccentricity. « *Dans cette hypothèse du froid absolu de l'espace, s'il est possible de la concevoir, tous les effets de la chaleur, tels que nous les observons à la surface du globe, seraient dus à la présence du Soleil. Les moindres variations de la distance de cet astre à la Terre occasionneraient des changements très considérables dans les températures, l'excentricité de l'orbite terrestre donnerait naissance à diverses saisons.* »⁽¹⁾ De nombreux travaux scientifiques au cours du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle ont progressivement permis de découvrir et prouver l'existence de variations climatiques passées importantes (période glaciaire – interglaciaire) et d'émettre l'hypothèse que ces

variations climatiques avaient pour origine... les variations des positions relatives de la Terre et du Soleil (Bard, 2004).

Le début d'un long travail encore inachevé

Ainsi, Fourier a établi les principes fondamentaux qui régissent la température de surface d'une planète, et notamment les principes de l'effet de serre : l'ajustement de la température de surface pour atteindre l'équilibre énergétique ainsi que le rôle essentiel de la dissymétrie entre les propriétés radiatives de l'atmosphère dans le spectre solaire (atmosphère transparente) et dans le spectre infrarouge thermique (atmosphère partiellement opaque). Près de deux siècles seront nécessaires pour quantifier et comprendre ces phénomènes. Il restait notamment à établir la loi d'émission du corps noir (loi de Stefan-Boltzmann) et à comprendre la décroissance verticale de la température de la basse atmosphère et son rôle sur le rayonnement émis vers l'espace.

De même, il a fallu se rendre compte du rôle essentiel des constituants mineurs de l'atmosphère (vapeur d'eau...) sur les propriétés radiatives dans l'infrarouge et apprendre à les mesurer et à les calculer. Aujourd'hui, ces travaux se poursuivent, notamment dans le cadre des études sur les changements climatiques futurs. La vapeur d'eau étant le principal gaz à effet de serre, on cherche à mieux comprendre sa distribution verticale, le lien avec la circulation générale atmosphérique et avec les processus de petite échelle. En effet, c'est l'incertitude sur la distribution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère qui est actuellement l'une des principales limites à l'estimation des changements climatiques passés et futurs.

Remerciements

Un séminaire de Ray Pierrehumbert m'a donné envie d'en savoir davantage sur le mémoire de Fourier présenté ici. Je remercie Nicole Lempérière, Édouard Bard et les deux réviseurs pour leurs critiques et suggestions.

(1) *ibid.*, p. 106

Bibliographie

- Bard E., 2004 : Effet de serre et glaciations, une perspective historique (Greenhouse effect and ice ages: historical perspective). *C. R. Geoscience*, 336, 603-638.
- De Saussure H.-B., 1779 : Des causes du froid qui règne sur les montagnes. *Voyages dans les Alpes*. Neuchâtel, II, XXXV, 347-372.
- Fourier J.-B. J., 1824 : Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Annales de Chimie et de Physique*, 2^e série, XXVII, 136-167.
- Fourier J.-B. J., 1827 : Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. *Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France*, VII, 570-604.
- Fourier J.-B. J., 1890 : *Œuvres de Fourier*. Gauthier-Villars, Paris, II, 636 p.
- Grinevald J., 1992 : De Carnot à Gaya, l'histoire de l'effet de serre. *La Recherche*, 243, 23, 532-538.
- Pierrehumbert R. T., 2004 : Greenhouse effect: Fourier's concept of planetary energy balance is still relevant today. *Nature*, 432, 677.
- Tyndall J., 1863 : *Heat as a Mode of Motion*. 1st ed., D. Appleton, New York, 480 p.
- Tyndall J., 1887 : *Heat as a Mode of Motion*. 7th ed., Longmans, Green, London, 591 p.
- Les articles de Joseph Fourier et de Horace-Bénédict de Saussure sont accessibles via Gallica, la bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France, à l'adresse suivante : <http://gallica.bnf.fr/>.

Pour en savoir plus

- Dhombres J. et J.-B. Robert, 1998 : *Joseph Fourier, créateur de la physique-mathématique*. 1^{re} édition, Belin, Paris.
- Dhombres J. et J.-B. Robert, 2000 : *Joseph Fourier, créateur de la physique-mathématique*. 2^e édition, Belin, Paris.