



HAL
open science

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

Jean-Louis Dufresne

► **To cite this version:**

Jean-Louis Dufresne. Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre. *La Météorologie*, 2006, 53, pp.42-46. hal-00113200

HAL Id: hal-00113200

<https://hal.science/hal-00113200>

Submitted on 13 Nov 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JEAN-BAPTISTE JOSEPH FOURIER

et la découverte de l'effet de serre

Jean-Louis Dufresne
Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD/IPSL, CNRS-UPMC)
4 place Jussieu, 75752 Paris Cedex 05
dufresne@lmd.jussieu.fr

Soumis à "La Météorologie".
Version révisée, 24 janvier 2006

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, d'analyse de Fourier, d'équation de Fourier. Son œuvre probablement la plus connue est la «Théorie analytique de la chaleur». Ici nous présentons l'importante contribution de J. Fourier aux sciences de l'univers à travers l'analyse de son «mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires.»

JEAN-BAPTISTE JOSEPH FOURIER and the discovery of the greenhouse effect.

Abstract :

Joseph Fourier is well known for his mathematical studies and for his work on heat diffusion. Fourier series, Fourier coefficients, Fourier integrals, Fourier analysis, Fourier equation are common expressions. Fourier most popular work is probably the «analytical theory of heat». Here we present the important contribution of J. Fourier to the Earth and space sciences by analysing his «memoir on the temperature of the Earth and planetary spaces».

Le mémoire de J. Fourier sur les températures du globe terrestre

*«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.»*¹ Dans l'introduction de son "mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire", publié en 1824 ² 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, comme ayant situé "le problème de la température de la Terre dans son contexte cosmologique" (Grinevald, 1992).

¹Œuvres de Fourier, t.2, p.97

²Ce 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*. Cette version a ensuite été publiée en 1890 dans un recueil des œuvres de Fourier ; les citations et la pagination se rapportent à ce dernier recueil.

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. J. 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 J. Fourier ne se servait de ces résultats pour en déduire que les phénomènes clefs 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 25 ans auparavant, il était encore très mal connu et était appelé "chaleur obscure". La présentation par Fourier des échanges radiatifs infrarouges est très qualitative, très courte (environ 2 pages de son mémoire long de 28 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 est déterminée par son bilan d'énergie

Si J. Fourier est souvent considéré comme l'un des scientifiques à l'origine de la découverte de l'effet de serre (e.g. 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 J. 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 concevoir 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.»*³

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.

J. Fourier a également identifié les différents modes de transferts 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 :

1. *La Terre est échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats ;*
2. *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 ;*
3. *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.*

³ibid, p. 102

»⁴

Les échanges d'énergie par rayonnement et «l'effet de serre»

Pour les échanges par rayonnement, J. 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 (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. H.B. de Saussure observa que la température à l'intérieur de la boîte était beaucoup plus élevée qu'à l'extérieur, et J. Fourier en donna une interprétation. «*La théorie de cet instrument est facile à concevoir. Il suffit de remarquer : 1° que la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est point dissipée immédiatement par le renouvellement de l'air ; 2° 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 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.*»⁵ J. 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'énergies vers l'espace. Il en déduit les conséquences pour la température d'équilibre de 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.*»⁶

Ainsi J. Fourier a jeté les bases de ce qui fut 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 J. 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, 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.*»⁷ Ceci 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". J. 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.*»⁸ De nombreuses connaissances théoriques et données expérimentales manquaient encore à l'époque.

⁴ibid, p. 97

⁵ibid, p. 110

⁶ibid, p. 111

⁷ibid, p. 111

⁸ibid, p. 110

Les échanges de chaleur entre la surface et l'intérieur de la Terre

La partie la plus longue du mémoire de J. 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 J. Fourier d'être quantitatif dans ses propos. A l'époque de Fourier, on pensait que la Terre, initialement très chaude, était en cours de refroidissement, et que ceci 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.

J. 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. J. 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 chaleurs et additionner ensuite leurs effets.

Pour les apports solaires en surface, J. 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 30m 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.»*⁹

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 m ou 40 m. 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.

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, J. 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.»*¹⁰

J. Fourier sous-estime les transports de chaleur par l'atmosphère et l'océan

J. 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 aériformes, la propriété de la transporter rapidement dans certaines directions. C'est cette même propriété qui, se combinant avec la force centrifuge,*

⁹ibid, p. 99

¹⁰ibid, p. 118

déplace et mêle toutes les parties de l'atmosphère et celles de l'Océan ; elle y entretient des courants réguliers et immenses.»¹¹ 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.*»¹²

J. Fourier n'avait pas les moyens d'estimer ces transports de chaleur par l'atmosphère et l'océan. C'est seulement au début du 20^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 satellites du bilan radiatif au sommet de l'atmosphère. J. 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 PW (6 10¹⁵ 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 en 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 J. Fourier a montré que l'apport par les échanges de chaleur avec l'intérieur de la Terre sont faibles 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 faux à cause des hypothèses fausses sur le transport méridien d'énergie. J. 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.*»¹³ C'est J. Tyndall (Tyndall, 1863) qui comprendra plus tard que l'effet de serre est un des phénomènes qui réduit l'amplitude du cycle diurne et du cycle saisonnier.

J. 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 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.*»¹⁴ L'explication est pertinente mais l'ordre de grandeur n'y

¹¹ibid, p. 110

¹²ibid, p. 109

¹³ibid, p. 106-107

¹⁴ibid, p. 107

est pas : d'après les estimations actuelles l'espace inter-stellaire émet un rayonnement correspondant à celui d'un corps noir à 3K, et l'apport du rayonnement émit par les objets célestes proches est encore plus faible.

Finalement, une température nulle de l'espace planétaire rendrait, d'après J. Fourier, la Terre trop sensible à une variation de la distance Terre-soleil, à un changement d'excentricité. « *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.* »¹⁵ De nombreux travaux scientifiques au cours du 19^e siècle et au début du 20^e siècle ont progressivement permis de découvrir et prouver l'existence de variations climatiques passées importantes (période glaciaire-inter glaciaire) et d'émettre l'hypothèse que ces variations climatiques avaient pour origine... des variations des positions relatives de la Terre et du soleil (e.g. Bard 2004).

Le début d'un long travail encore inachevé

Ainsi J. 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). 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 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, CO_2 , CH_4 ...) 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 petites échelles. En effet c'est l'incertitude sur la distribution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère qui est actuellement 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 d'avantage sur le mémoire de J. Fourier présenté ici. Je remercie Nicole Lempérière, Edouard Bard et les deux réviseurs pour leurs critiques et suggestions.

Bibliographie :

Bard, E., "Effet de serre et glaciations, une perspective historique. (Greenhouse effect and ice ages : historical perspective)", *C. R. Geosci.* 336, pp. 603-638 (2004).

Fourier, J.-B. J. "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", *Annales de Chimie et de Physique*, t. XXVII, p. 136-167 ; 1824

Fourier, J.-B. J. "Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire", *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, tome VII, pp. 570-604, 1827

¹⁵ibid, p. 106

Fourier, J.-B. J. , “(Euvres de Fourier”, tome 2, publié par G. Darboux, Ed. Gauthier-Villars, 636 p., 1890.

Grinevald J., ”De Carnot à Gaya, l’histoire de l’effet de serre”, La Recherche n°243, vol 23, p. 532-538, mai 1992

Pierrehumbert, R. T., ”Greenhouse effect : Fourier’s concept of planetary energy balance is still relevant today.” Nature, Vol. 432, p. 677, 9 décembre 2004

de Saussure, H.-B., “Des causes du froid qui règne sur les montagnes”, dans son livre “Voyages dans les Alpes”, tome second, chapitre XXXV, p. 347-372. Neuchatel, 1779.

Tyndall, J. , Heat a Mode of Motion, 1st ed., D. Appleton, New York, 1863, 480 p. (7th ed., Longmans, Green, London, 1887, 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 sur la vie et l’œuvre de Fourier :

Jean Dhombres, J. et J.-B. Robert. “Joseph Fourier, Créateur de la physique mathématique.” Belin, Paris, 1998 ; 2e édition, Belin, 2000