

Rendez-vous sur

■ POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Nouveau ! Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters
- Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.
- Suivez notre actualité en direct :



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>

+ de 9000 fans



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

HISTOIRE DES SCIENCES

Herschel et l'énigme de l'infrarouge

L'astronome William Herschel a découvert et étudié le rayonnement infrarouge. Il eut l'intuition qu'il était de même nature que la lumière visible. L'ensemble sera désigné plus tard par le terme d'ondes électromagnétiques.

Jack White

La plupart des encyclopédies et livres de physique attribuent à l'astronome britannique sir William Herschel la découverte du rayonnement infrarouge en 1800. Toutefois, cela n'est pas strictement exact et ne rend pas tout à fait justice aux travaux de Herschel.

Nous découvrons tous très jeunes l'infrarouge, quand nous sentons la chaleur à distance d'un objet chaud ; et nous savons que ce rayonnement est invisible, car la chaleur se ressent aussi dans l'obscurité la plus totale. Herschel a mis en évidence l'existence de ce rayonnement et a aussi trouvé les premières preuves que la lumière et l'infrarouge sont deux aspects d'un même phénomène, nommé aujourd'hui rayonnement électromagnétique. Lors d'une série d'expériences simples, Herschel a trouvé la première pièce d'une des grandes énigmes de la physique, dont la résolution a nécessité encore un siècle.

Pour comprendre la démarche de Herschel, ses articles originaux sont une source riche d'informations. Ils semblent directement restituer les réflexions et les expériences de leur auteur. La plus grande difficulté en lisant ces écrits est de suivre le fil du raisonnement de Herschel, entrecoupé de nombreuses digressions et de pages de relevés de température.

Dans un article lu à la *Royal Society* de Londres le 27 mars 1800, Herschel utilisa le terme de « chaleur radiante » pour désigner cette chaleur ressentie à distance. Le terme « infrarouge » [infra signifie « en dessous » en latin] n'est apparu que dans les années 1880, d'un auteur inconnu.

Herschel n'était pas initialement un scientifique. D'origine allemande, il a commencé sa carrière comme musicien dans une formation militaire. En 1773, à l'âge de 34 ans, six ans après son arrivée à Bath, au Royaume-Uni, où il occupait un poste de professeur de musique, il acheta un petit télescope et un livre d'astronomie. C'était le début d'une nouvelle carrière.

Célébrité d'astronome

Dès l'année suivante, il polissait ses propres miroirs pour construire des télescopes plus grands et de meilleure qualité, et il passait ses nuits à étudier le ciel étoilé. La dextérité de Herschel lui valut rapidement la réputation de meilleur fabricant de télescopes de son époque. Sa célébrité atteignit son point culminant en 1781, quand il découvrit la planète Uranus. Il fut alors nommé astronome royal, fonction dotée d'un modeste salaire annuel de 200 livres.

Dès lors, Herschel put consacrer tout son temps à l'astronomie. Avec sa sœur Caroline — également une astronome reconnue —, il s'installa à Slough, près du château de Windsor, car l'une des conditions posées à sa nomination était qu'il devait être à la disposition du roi George III et de sa famille à tout moment où il leur aurait pris l'envie d'observer les étoiles.

C'est parce qu'il cherchait à mettre au point le meilleur filtre possible pour observer le Soleil en toute sécurité que Herschel a commencé à explorer le domaine des infrarouges. Ses spéculations et conclusions ont été souvent contradictoires, certaines

fausses, mais d'autres très pertinentes. L'histoire des expériences de Herschel est celle du rôle de l'intuition dans la découverte scientifique, et du conflit entre les convictions classiques et les concepts nouveaux.

Le spectre électromagnétique s'étend des rayons gamma (dont les longueurs d'onde peuvent être plus courtes que le diamètre d'un atome) aux ondes radio (avec des longueurs d'onde allant jusqu'à des milliers de kilomètres). Dans l'ensemble du spectre électromagnétique, l'homme ne détecte que deux plages étroites de longueurs d'onde. Nos yeux voient la lumière, qui occupe l'étroite bande de longueurs d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètre (du violet jusqu'au rouge), bande centrée approximativement sur la longueur d'onde du rayonnement le plus puissant émis par le Soleil. L'autre partie du spectre que nous percevons est le rayonnement infrarouge, de longueur d'onde comprise entre celles de la lumière visible et celles des micro-ondes, jusqu'à environ 1 000 micromètres, et qui se manifeste par la chaleur que nous ressentons sur la peau.

Dès le XVIII^e siècle, certains savants, tels le Hollandais Herman Boerhaave ou le Suisse Jean-Henri Lambert, discutent du lien entre lumière et chaleur. Il faut attendre le développement de la thermodynamique statistique, au XIX^e siècle, pour décrire la chaleur comme une agitation désordonnée des molécules. Cette agitation, dont la température est une mesure, est responsable de l'émission d'un rayonnement par la matière, qui est majoritairement infrarouge aux températures habituelles (voir la figure 1). Inversement,

le rayonnement infrarouge peut créer une agitation moléculaire et ainsi donner la sensation de chaleur sur la peau.

Bien que la lumière visible et le rayonnement infrarouge correspondent à des gammes voisines de longueurs d'onde (voir la figure 3), ces deux phénomènes sont perçus de façons si différentes qu'il est difficile d'imaginer qu'ils sont de la même nature.

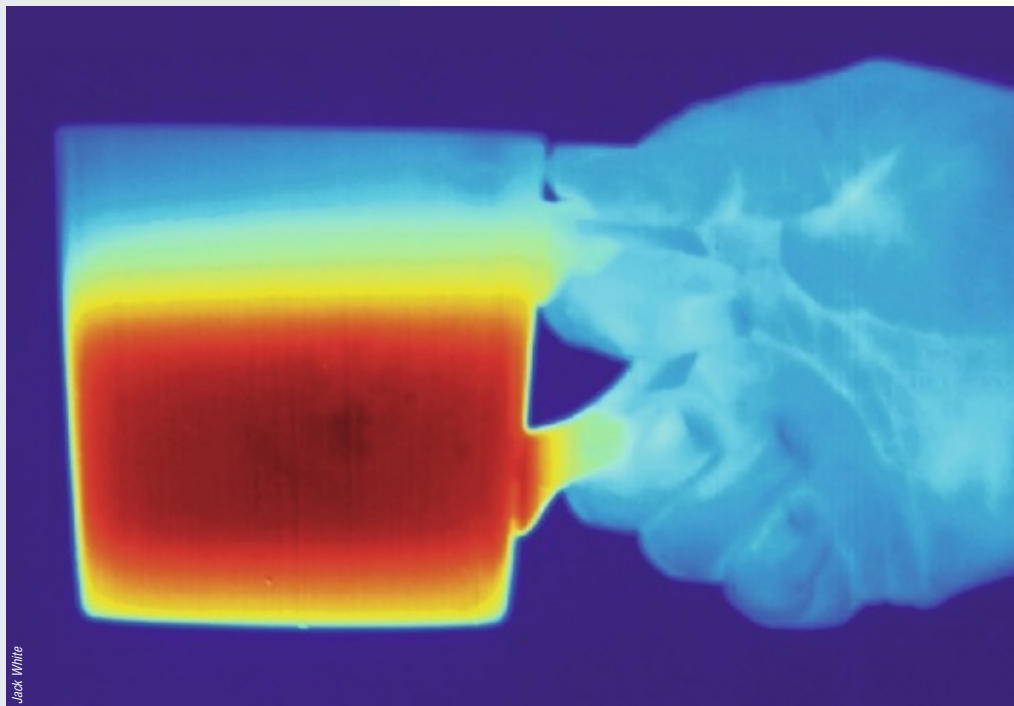
Par ailleurs, la lumière et l'infrarouge ne s'observent pas toujours ensemble. La plupart des sources lumineuses émettent également de l'infrarouge – c'est le cas d'une ampoule à incandescence –, mais on trouve souvent l'infrarouge seul. Un exemple familier est celui du grille-pain électrique qui, après avoir servi, ne rougeoie plus, mais dont la chaleur rayonnée est encore perceptible. Ainsi, lumière et chaleur semblent être deux phénomènes indépendants.

Ces différences pourraient expliquer pourquoi le rapprochement n'a pas été fait pendant de nombreux siècles, en dépit des diverses expériences. Peut-être cette association contraire à l'intuition explique-t-elle pourquoi le lien a été établi presque par accident, par une personne sans véritable formation scientifique.

Herschel observait les caractéristiques de la surface du Soleil depuis un certain nombre d'années, et il soumit un article sur le Soleil et les étoiles fixes à la *Royal Society* en 1794. Parvenir à observer les taches solaires à travers un grand télescope sans s'abîmer les yeux était depuis longtemps un défi. En expérimentant diverses combinaisons de verres colorés et fumés qui servaient de filtres, Herschel nota dans cet article :

« Ce qui semblait remarquable était que, lorsque j'utilisais certains d'entre eux, je ressentais de la chaleur, bien que j'eusse très peu de lumière ; tandis que d'autres me donnaient beaucoup de lumière, mais très peu de sensation de chaleur. »

Cette observation le conduisit à l'idée que les différentes couleurs ont une capacité plus ou moins grande de « chauffer des corps ». Poussant le raisonnement plus loin, Herschel se rendit compte que si la puissance thermique est inégalement distribuée, cela pourrait également être le cas pour la puissance d'éclairement. Il y aurait alors



1. CETTE TASSE contient un liquide chaud (en rouge) qui émet un rayonnement infrarouge. Il est possible de détecter ce dernier avec un appareil spécialisé. Mais la tasse n'émet pas, ou presque pas, de lumière visible. Malgré des aspects différents, la lumière visible et l'infrarouge sont tous deux des ondes électromagnétiques.



© Shutterstock/Georgios Kollidas

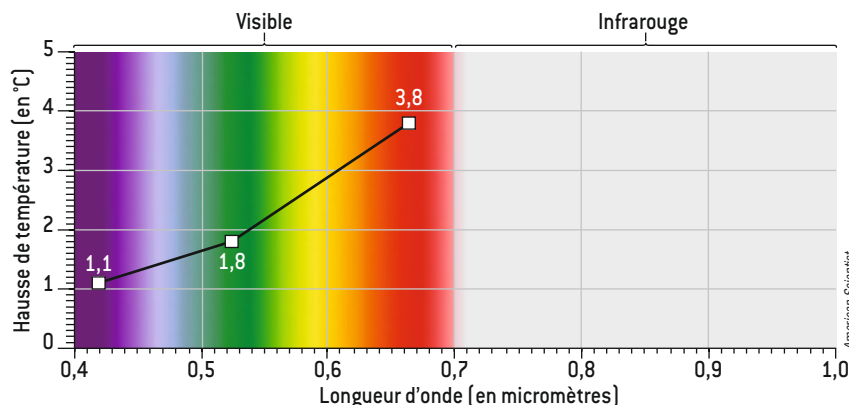
2. SIR WILLIAM HERSCHEL (1738-1822) a découvert le rayonnement infrarouge et a étudié ses propriétés, qui suggéraient une nature semblable à la lumière visible.

une plage optimale de couleur, mais elle serait différente de celle qui correspond au chauffage maximal. La connaissance de ces propriétés devait l'aider à concevoir le meilleur filtre pour observer le Soleil.

S'appuyant sur son expérience de fabrication de télescopes et en optique, Herschel construisit un instrument pour tester cette hypothèse. Il fabriqua ce que l'on nommerait un spectromètre, ou plus précisément un spectroradiomètre : un instrument conçu pour mesurer la puissance du flux lumineux à différentes longueurs d'onde.

Son premier instrument (voir la figure 4) réunit trois composants : un prisme, placé dans une fenêtre exposée au Sud afin de capter la lumière solaire, décomposer les couleurs et les diriger sur une table ; un petit panneau de carton percé d'une fente étroite ne laissant passer qu'une seule couleur ; et des thermomètres au mercure en verre avec leur bulbe noirci pour mieux absorber la lumière. Il plaça un thermomètre à la lumière et les autres dans l'obscurité pour mesurer la température ambiante de la pièce – la température de référence.

Les spectromètres actuels sont bien plus performants en termes de résolution,



3. LES MESURES DE TEMPÉRATURE DE WILLIAM HERSCHEL dans le spectre visible, comparées à la température ambiante, présentent une tendance à l'augmentation. En voulant savoir si cette hausse se poursuivait au-delà de la lumière rouge, Herschel a mis en évidence le rayonnement infrarouge, qu'il nomma « chaleur radiante ».

de sensibilité et de rapidité, mais les éléments de base sont restés les mêmes. On utilise toujours des prismes, mais une meilleure résolution est obtenue par interférence des ondes : les longueurs d'onde sont séparées par interférence constructive et destructive – les amplitudes des ondes s'ajoutant ou s'annulant. Les détecteurs actuels sont des semi-conducteurs refroidis par cryogénie, beaucoup plus petits, rapides et sensibles qu'un thermomètre au mercure. Cependant l'instrument de Herschel, aux mains du soigneux expérimentateur qu'il était, donnait des mesures d'une étonnante précision.

Avec ce dispositif, Herschel releva des températures, comparant tout d'abord les indications des thermomètres dans les conditions ambiantes pour vérifier la cohérence entre les instruments. Il plaça le thermomètre de mesure dans chaque bande de couleur, en l'y laissant dix minutes pour stabiliser la température. En commençant par le rouge, il obtint une mesure moyenne de 3,8 °C au-dessus de la température ambiante. Le vert et le violet donnaient respectivement 1,8 °C et 1,1 °C [voir la figure 3].

Grâce à cette expérience, Herschel confirma que la capacité de chauffage n'était pas la même d'une couleur à l'autre de la lumière incidente. Il entreprit alors de mesurer l'éclairement aux différentes longueurs d'onde.

Pour trouver le maximum d'éclairement, il dirigea les composantes colorées de la lumière sur divers petits objets observés à travers un microscope grossissant 27 fois. À partir de la brillance et de la clarté de ce qu'il vit, il évalua l'éclairement relatif.

Mesurer l'éclairement

Herschel réalisa dix expériences distinctes avec des objets vus en différentes couleurs. Il tenta de distinguer entre la couleur donnant le maximum d'éclairement et celle qui a la meilleure résolution ou « netteté ». Il ne parvint pas à tirer de conclusion concernant la résolution, mais pour l'éclairement, il fut en mesure d'affirmer :

« Le maximum d'éclairement se trouve dans le jaune le plus vif, ou le vert le plus pâle. Le vert lui-même est presque aussi brillant que le jaune ; mais à partir du vert foncé, la puissance d'éclairement diminue très sensiblement. »

Cette observation est remarquable : le jaune-vert est proche de la longueur d'onde où le Soleil émet le plus d'énergie, et exactement là où la sensibilité de l'œil humain est maximale. Estimant qu'il avait prouvé que la chaleur radiante comme la lumière ne sont pas également distribuées entre les couleurs, et muni de résultats de mesure montrant leurs différences, Herschel était prêt à utiliser ces découvertes pour

son problème d'observation du Soleil et la conception de filtres. Mais il ne le fit pas immédiatement. Au lieu de cela, il retourna aux données de température.

En effet, Herschel était surpris par ses résultats sur la température. Celle-ci augmentait progressivement du violet vers le rouge, sans présenter de maximum sous la forme d'un pic. Les mesures semblaient plutôt suggérer que le chauffage se poursuit dans la région sombre au-delà du rouge. Herschel voulut savoir ce qu'il en était.

Si le maximum se trouve en dehors du spectre visible, alors le chauffage ne provient pas de la lumière, mais d'autre chose. Herschel utilisa l'expression « lumière invisible », avec des termes choisis pour indiquer qu'il savait bien que c'était un oxymore :

« Je conclus de la même façon que le rouge pur est un peu en deçà du maximum de chaleur ; lequel se trouve peut-être un peu plus loin que la réfraction visible. Dans ce cas, la chaleur radiante sera au moins partiellement, voire principalement, constituée, si je peux me permettre l'expression, de lumière invisible ; c'est-à-dire de rayons venant du Soleil, qui ont une quantité de mouvement telle qu'ils ne sont pas adaptés à la vision. »

On note dans cet extrait de l'article qu'en décrivant les rayons en termes de quantité de mouvement, Herschel se référait aux expériences d'Isaac Newton de la fin du XVII^e siècle qui concluaient à la nature corpusculaire de la lumière.

La possibilité que la lumière soit de nature ondulatoire avait pourtant été fort bien argumentée par Christiaan Huygens, contemporain de Newton, mais la conception selon laquelle la lumière était un flux de minuscules particules était dominante à l'époque, en particulier en Grande-Bretagne. Ce point de vue changea dans les 15 années suivantes, mais, à ce moment-là, Herschel se représentait la lumière comme des particules ayant plus ou moins d'« efficacité » dans leur effet sur la matière.

Ce n'est pas la notion de rayons invisibles qui intéressait tant Herschel. C'étaient leurs propriétés qui le captivaient. Il était clair pour lui que la chaleur radiante avait les mêmes propriétés optiques de « réfrangi-

bilité » (nommée aujourd'hui réfraction) et de dispersion que la lumière.

La réfraction est le changement de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre (conséquence d'un changement de sa vitesse de propagation), comme le passage de l'air au verre. La dispersion (ou décomposition) de la lumière en plusieurs composantes de couleurs différentes est due à la réfraction : comme cette dernière dépend de la longueur d'onde, les différentes couleurs sont réfractées selon des angles différents. Les arcs-en-ciel et les prismes en sont des exemples.

Herschel ne se représentait pas le rayonnement en termes de longueurs d'onde, mais, en tant que fabricant de lentilles, les effets de la décomposition lui étaient familiers et il savait comment les corriger pour produire des lentilles minimisant ce qu'on nomme aujourd'hui l'aberration chromatique, c'est-à-dire le fait que les différentes couleurs traversant une lentille ne convergent pas vers un même foyer.

Visible et infrarouge : une même nature

Le concepteur de télescopes qu'était Herschel en a tout de suite saisi la portée : si la lumière et la chaleur radiante ont les mêmes propriétés optiques, si elles présentent le même comportement dans leurs interactions avec la matière, cela n'indiquerait-il pas qu'elles sont une seule et même entité ? Cette question domina la réflexion et les travaux de Herschel : neuf jours seulement après avoir écrit son premier article et dix jours avant de le présenter officiellement, il en écrivit un autre plus court pour la *Royal Society*, intitulé « Expériences sur la réfrangibilité des rayons invisibles du Soleil ».

Notons que ce titre fait écho à Newton. En effet, dans l'*Optique* de Newton (1704), un théorème est intitulé « La lumière du Soleil est constituée de rayons différemment réfrangibles ». Newton a beaucoup influencé Herschel. L'approche de ce dernier est presque identique aux expériences de Newton avec un prisme placé sur une fenêtre pour projeter des couleurs sur un

mur. Herschel a repris la méthode qualitative de Newton pour visualiser le spectre et l'a transformée en un instrument quantitatif. Il avait peut-être le sentiment (justifié) de poursuivre les travaux que Newton avait entrepris avec les couleurs de la lumière en étendant le concept de « réfrangibilité différente » aux rayons du Soleil se trouvant au-delà des couleurs visibles.

Herschel reprit sa première expérience et mesura la température dans les zones sombres au-delà du rouge. Il utilisa la position des couleurs visibles comme référence pour noter ses points de mesure dans l'infrarouge.

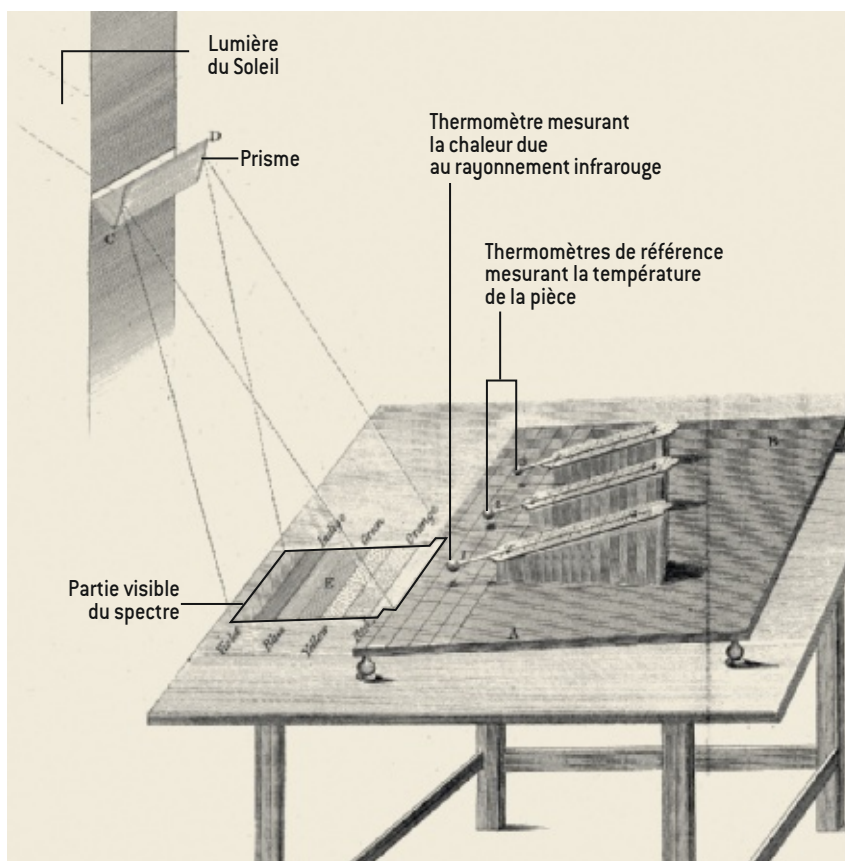
Il releva avec son thermomètre une température qui augmentait jusqu'à atteindre un maximum, puis diminuait. Le ton du deuxième article de Herschel traduit beaucoup d'excitation et de confiance dans sa

L'AUTEUR

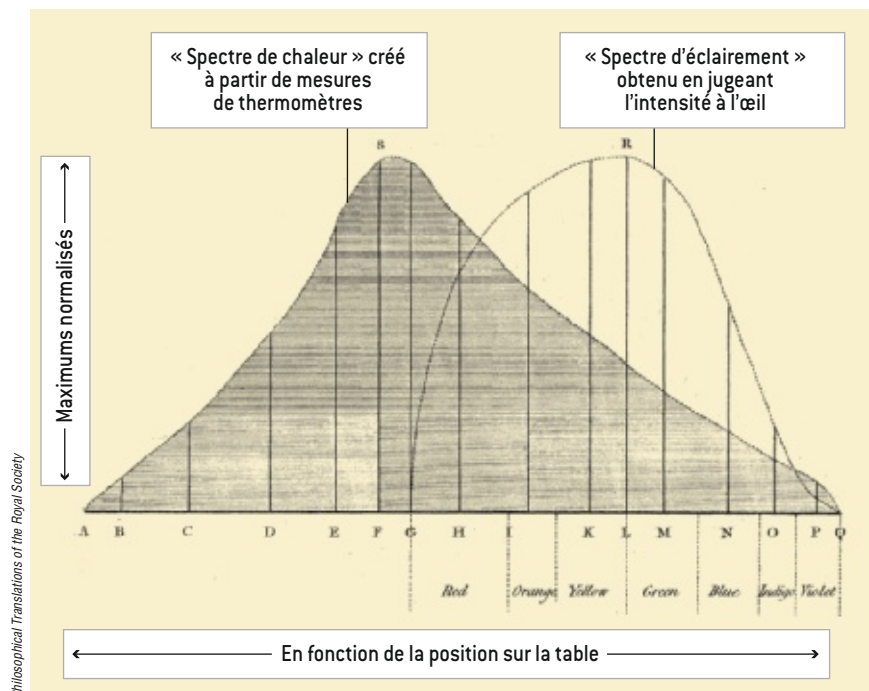


Jack WHITE a été directeur du Groupe de mesures infrarouges avancées pour le Département de la défense des États-Unis. Il travaille aujourd'hui comme conseiller pour l'analyse de données radiométriques infrarouges.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.



4. L'EXPÉRIENCE DE HERSCHEL met en jeu un prisme, qui décompose la lumière du Soleil, et un thermomètre, qui mesure la température pour différentes couleurs spectrales. En modifiant son spectroradiomètre, l'astronome mit en évidence qu'un rayonnement invisible était source de chaleur. Le dessin du dispositif est tiré de son deuxième article. L'expérience a montré que la chaleur radiante a les mêmes propriétés optiques de réfraction que la lumière.



Philosophical Transactions of the Royal Society

5. LE DERNIER ARTICLE DE HERSCHEL concernant l'infrarouge, en 1800, présente le graphique montrant les distributions spectrales de la lumière visible et de la chaleur radiante (le « spectre d'éclairement » et le « spectre de chaleur »). L'association trompeuse de ces deux courbes a conduit Herschel à conclure à tort que la lumière visible et la chaleur radiante sont de natures différentes.

découverte. Dans toutes ses expériences, il avance rarement des opinions qui ne soient pas solidement étayées par les données, mais il termine cet article par un argument de nature philosophique :

« Pour conclure, si nous nommons lumière ces rayons qui éclairent les objets, et chaleur radiante ceux qui chauffent les corps, on peut se demander si la lumière est différente en essence de la chaleur radiante. En réponse à quoi je suggérerais que les règles de la philosophie ne nous autorisent pas à admettre deux causes différentes pour expliquer certains effets, s'il est possible de les expliquer par une seule. »

La réputation de Herschel en tant qu'astronome contribua probablement à assurer à ses articles une réception favorable par la plupart des scientifiques, mais pas par tous. Son troisième article s'ouvre sur une note résolument défensive. Herschel y répond à la critique d'une personne, un « auteur célèbre », qui s'est offusquée de l'expression « chaleur radiante ». Ce détracteur

pourrait avoir été John Leslie, qui était considéré comme un expert de la chaleur et qui supportait mal l'irruption d'un amateur dans son domaine. Dans une lettre publiée dans *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts* de William Nicholson, Leslie écrivit :

« Il semblerait que cet astronome compétent, en abordant une nouvelle voie de recherche, n'ait pas utilisé l'appareillage adapté à la subtilité du sujet, ni ne se soit suffisamment prémuni contre les nombreuses sources cachées d'erreurs. Je me considère habilité à parler avec la plus grande confiance parce que j'ai longtemps dirigé mes recherches dans la même voie [...]. Je n'hésite donc pas à affirmer que la proposition capitale de Dr Herschel est le fruit d'observations fallacieuses [...]. Et quels que soient mes sentiments concernant la validité des conclusions, j'ai résolu de soumettre calmement et impartialement les prétendus faits à l'épreuve de l'expérience. Quand un photomètre a été placé

au-delà du spectre, [...] pas le moindre effet n'a été perçu. »

Si, comme le prétendit Leslie, son thermomètre différentiel [qu'il appelait « photomètre »] n'a trouvé aucune chaleur au-delà du visible, c'est qu'il était défectueux. Ce point allait bientôt être prouvé de façon spectaculaire par des expériences indépendantes conduites par la *Royal Society*. La nature de la chaleur faisait partie des principaux sujets discutés par les physiciens ; pour ne pas attirer d'autres critiques, Herschel remplaça le terme de « chaleur radiante » par « les rayons qui provoquent la chaleur ».

Oppositions malvenues

L'opposition que Herschel rencontra ne ralentit pas ses expériences, mais ces attaques ont peut-être eu un impact important : dans la seconde partie de son article final, présenté le 6 novembre 1800, Herschel ne mit plus l'accent sur la recherche de preuves de similitude entre la lumière et la chaleur radiante, mais sur les éléments qui les différencient.

Herschel se lança dans un vaste programme de construction d'instruments pour examiner et mesurer chaque propriété. Aux prismes et thermomètres à mercure initiaux, il ajouta diverses lentilles et miroirs dans une douzaine de configurations différentes et une panoplie de matériaux transparents pour comparer la transmission.

En plus de 200 expériences, il confirma, de chaque façon qu'il lui était possible de tester, que la lumière et la chaleur radiante ont les mêmes propriétés optiques. Mais du fait qu'il cherchait les différences plutôt que des ressemblances, il passa à côté de certaines relations ou les interpréta de façon erronée.

Par exemple, il mesura les effets de la diffusion et trouva que le rayonnement diffuse davantage dans l'infrarouge. Ce qui est exact, car la diffusion dépend de la longueur d'onde. Mais Herschel attribua ce résultat à une nature différente de la lumière et de la chaleur, plutôt que d'y voir des signes d'un comportement similaire lors de leur interaction avec la matière, laquelle interaction diffère en intensité selon qu'il s'agit de la lumière ou de l'infrarouge.

Herschel ne comprenait pas vraiment les causes de ces phénomènes, et il avait une capacité limitée à formuler mathématiquement ses découvertes. Ses atouts étaient la connaissance pratique de l'optique, combinée à son habileté en matière de fabrication d'instruments et ses talents d'observateur.

Son dernier article, présenté le 6 novembre 1800, contient le premier graphique représentant les distributions spectrales de la lumière visible et du rayonnement infrarouge (voir la figure 5). Il nomma ces courbes le « spectre d'éclairement » et le « spectre de chaleur ». Sur l'axe vertical, Herschel reporta la température mesurée et la luminosité perçue. Il leur fixa des maximums égaux afin de comparer l'étendue relative et la forme des distributions ainsi que la localisation de leur maximum. Pour l'axe horizontal, la notion de longueur d'onde étant encore inconnue, il utilisa la distance par rapport à l'endroit où les couleurs visibles éclairaient la table. Cet axe est inversé par rapport à la convention actuelle, qui consiste à représenter les longueurs d'onde croissantes de gauche à droite.

Un graphique trompeur

Le graphique de Herschel est le produit de son imagination, de son intuition et de mois de travail laborieux, mais il était trompeur. Son allure générale est sans doute le facteur décisif qui le conduisit à conclure que la lumière et la chaleur radiante sont, après tout, fondamentalement différentes.

La représentation des données peut influencer sur leur interprétation. Même aujourd'hui, il est difficile d'examiner le graphique de Herschel sans avoir l'impression que la lumière et la chaleur radiante sont deux entités distinctes. Les courbes de Herschel sont toutes deux exactes, mais elles correspondent à des quantités différentes et presque sans rapport, et ne devraient pas être représentées ensemble. Son erreur ne vient pas de ses données de base, mais du fait qu'il supposait les courbes comparables.

L'un des éléments manquants pour l'interprétation des courbes, et qui était un concept inconnu en 1800, est l'effet de la réponse du détecteur. La mesure réalisée

par tout instrument ou détecteur, y compris l'œil, résulte du produit de deux courbes : la distribution de la puissance reçue, et la courbe de réponse de l'instrument. Herschel supposait que le spectre mesuré représentait directement la distribution du rayonnement, sans imaginer que l'œil déformait ce signal par sa réponse.

Tout spectre créé à partir de ce que l'œil enregistre s'annule en dehors des limites de la vision. À l'intérieur de ces limites, la puissance reçue à n'importe quelle longueur d'onde est pondérée par la sensibilité de l'œil à cette couleur. Le pic de sensibilité, comme Herschel l'a correctement déterminé, est le jaune-vert à une longueur d'onde de 0,555 micromètre.

Par conséquent, le spectre d'éclairement de Herschel est davantage une carte de la façon dont l'œil répond aux couleurs que de la distribution de la lumière. Il voyait dans la forme de sa courbe une preuve que la lumière n'est pas également répartie sur le spectre. Son hypothèse était correcte, mais ses données ne le montraient pas. Il aurait obtenu une courbe pratiquement identique même si la distribution avait été uniforme.

En novembre 1800, Herschel est arrivé au bout de ce qu'il était possible de réaliser avec les connaissances et les techniques de son époque. Il retourna sans hésitation à son domaine de prédilection : l'astronomie.

L'apparence trompeuse de son graphique et les différentes sensations que sont la vision de la lumière et la sensation de chaleur l'ont finalement emporté sur ses données soigneusement recueillies, l'amenant à conclure que les deux énergies ne sont pas une seule et même grandeur physique.

Néanmoins, notre compréhension actuelle du rayonnement électromagnétique s'est développée à partir des mesures simples de température que Herschel a réalisées dans la lumière solaire. Elle s'est poursuivie avec l'unification du spectre par James Clerk Maxwell en 1861 et la formulation de la théorie quantique au XX^e siècle. Herschel ne pouvait pas prouver de façon concluante que la lumière et la chaleur radiante sont de même nature, mais ses expériences ont apporté des indices que d'autres allaient compléter pour résoudre l'énigme. ■

Le télescope spatial Herschel

L'Agence spatiale européenne a lancé en 2009 un télescope spatial nommé Herschel en l'honneur de l'astronome. Cet instrument observe le rayonnement infrarouge dans l'Univers. Il permet d'étudier la formation des nouvelles étoiles et l'évolution des galaxies. L'image ci-dessous est un nuage moléculaire (en fausses couleurs) au sein duquel se forment des étoiles.



NASA/Herschel

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Heilbron, *Weighing imponderables and other quantitative science around 1800*, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 24, pp. 127-131, 1993.

D. J. Lovell, *Herschel's dilemma in the interpretation of thermal radiation*, *Isis*, vol. 59(1), pp. 46-60, 1968.

W. Herschel, *Experiments on the solar, and on the terrestrial rays that occasion heat*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, pp. 293-326 et 437-538, 1800.

W. Herschel, *Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, pp. 284-292, 1800.

LOGIQUE & CALCUL

L'homme, meilleur joueur que la machine

Grâce à de nouvelles méthodes de coordination, l'intelligence humaine produit parfois des résultats supérieurs à ceux des programmes informatiques.

Jean-Paul DELAHAYE

En mai 1997, le lendemain de la victoire de l'ordinateur *Deep Blue* sur Gary Kasparov, le quotidien français *Libération* titrait « L'homme est-il foutu ? » Aux échecs, l'ordinateur bat aujourd'hui le meilleur humain et cela semble irréversible. Cette supériorité de la machine concerne de nombreux autres jeux dits de stratégie. En fait partie le jeu de dames anglaises, pour lesquelles l'ordinateur sait calculer des stratégies optimales, c'est-à-dire définitivement imbattables, ce qu'il ne sait pas faire dans le cas des échecs où les programmes jouent bien, mais d'une façon perfectible (voir l'article de cette rubrique de janvier 2008).

Cependant, le champion humain reste meilleur que la machine au jeu de go. Le niveau « sixième dan » atteint en 2012 par le programme *Zen19D* a inquiété des professionnels, mais il ne fait pas de l'ordinateur un égal de l'homme à ce jeu.

Moins attendu, l'ordinateur Watson d'IBM a battu l'être humain en 2011 au jeu *Jeopardy* (du type *Questions pour un champion*), dont on pensait que la nature non combinatoire et fondée sur des énigmes linguistiques exigeait des connaissances générales et une intelligence hors de portée des machines. L'ordinateur a montré que l'intelligence artificielle progresse même là où certains pensaient qu'elle resterait bloquée. Bien sûr, la base de données de 15 téraoctets de *Watson*, qui lui donne accès instantanément à une quantité colossale d'informations, a contribué au

succès de l'ordinateur et s'il a gagné, c'est en utilisant des algorithmes de traitement du langage naturel très différents des procédures du cerveau humain. Comme aux échecs, la machine gagne, mais elle n'imité pas.

L'ordinateur progresse aussi dans la résolution d'autres tâches où sa logique binaire semblait le handicaper. Il y a la résolution automatique des mots-croisés, où le programme *Dr Fill* approche les meilleurs joueurs humains. Pour la conduite automobile, les progrès sont tels que dans certains États américains, des autorisations ont été accordées pour que des systèmes automatisés de conduite circulent sur les routes au milieu des autres véhicules... à la condition qu'ils soient surveillés par un humain pouvant reprendre le contrôle à tout instant.

Or de nouvelles méthodes d'utilisation et de coordination de l'intelligence humaine produisent des résultats étonnants, et même des renversements inespérés ! Plusieurs problèmes dont la nature combinatoire semblait déterminer une implacable victoire de la machine sur l'humain voient celui-ci produire de meilleures solutions que les algorithmes les plus perfectionnés fonctionnant sur les plus puissants des systèmes.

À la condition de transcrire les problèmes sous de bons formats (ce que l'on fait avec l'ordinateur), les cerveaux humains sont dans ces cas de meilleurs calculateurs que les ordinateurs. L'indispensable présentation sous la forme de jeu, et les interfaces informatiques graphiques complexes pour

que l'intelligence ludique des humains produise ces prouesses, suggèrent que c'est l'association ordinateur-humain qui résout les problèmes posés. Une telle analyse serait injuste, car l'ordinateur n'est qu'un serviteur qui présente les données, exécute les commandes de manipulation formulées par le joueur humain, et évalue s'il progresse vers la solution ou l'atteint : toutes les décisions sont prises par le joueur.

Plier des protéines

La connaissance de la suite linéaire des nucléotides d'une séquence génétique codant une protéine, une suite de lettres prises parmi A, C, T et G, détermine la séquence des acides aminés qui composent la protéine et son repliement en trois dimensions. Cette forme dans l'espace détermine les parties actives de la molécule et comment la protéine interagit avec les autres molécules. Connaître ce repliement est donc essentiel au biologiste. En première approximation, c'est un problème de minimisation d'énergie, mais les degrés de liberté sont si nombreux (plusieurs dizaines, parfois beaucoup plus) que la détermination du bon repliement est extrêmement difficile ; les programmes informatiques spécialisés n'y réussissent aujourd'hui qu'assez médiocrement.

Un programme interactif en ligne dénommé *Foldit* (« Replie-le ») a été développé conjointement par le *Center for Game Science* de l'Université de Washington et le