

Sadi Carnot et la naissance de la thermodynamique

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Morgan ALMANZA - Hélène HORSIN MOLINARO - Martino LO BUE

Édité le
08/01/2024

école _____
normale _____
supérieure _____
paris – saclay _____

En 1824, il y a deux siècles, était publié « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* ». Cet ouvrage, rédigé par Sadi Carnot alors âgé de 27 ans, pose les bases d'une discipline encore inconnue qui prendra le nom de *thermodynamique* au milieu du XIX^e siècle.

Mais qui est Sadi Carnot ? Et qu'a-t-il rédigé ?

Cette ressource propose de parcourir la vie de Sadi Carnot et de revenir sur son ouvrage *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, ainsi que sur le développement de la thermodynamique au XIX^e siècle ; enfin, la famille Carnot se distinguant par des scientifiques et des hommes d'état, quelques vies seront évoquées.

1 – La courte vie de Sadi Carnot (1796-1832) [1,2]

Nicolas Léonard Sadi Carnot est né le 1^{er} juin 1796 à Paris, au palais du Petit-Luxembourg (l'actuelle résidence du président du Sénat). Il est le fils aîné de Lazare Carnot (1753-1823) et de Sophie Dupont de Moringhem (1764-1813). Son prénom, Sadi, a été choisi par son père en référence au poète persan Saadi¹.

1.1 - Naissance et héritage paternel (1796)

Au moment de la naissance de Sadi Carnot, le palais du Petit-Luxembourg est affecté au Directoire², régime politique mis en place en 1795 après la Terreur³ ; quatre des cinq directeurs y ont leurs appartements de fonction, dont Lazare Carnot dit « le Grand Carnot » ou « l'organisateur de la Victoire » par son rôle dans les succès des armées françaises de la Révolution (figure 1).

Lazare Carnot, est mathématicien et ingénieur, élève du célèbre Gaspard Monge⁴, et auteur d'un *Essai sur les machines en général* publié en 1783. Également militaire, il entre dans l'arme du génie à 18 ans en 1771. Rallié à la Révolution Française, Lazare Carnot est élu député du Pas-de-Calais à l'assemblée législative en 1791, puis à la Convention en 1792. En janvier 1793, il vote la mort de Louis XVI, ce qui aura des conséquences à la chute de l'Empire qui verra la restauration de la monarchie. En 1793, il est élu membre du Comité de salut public⁵, il se distinguera durant les guerres de la Révolution française, ce qui lui vaudra ses surnoms (le Grand Carnot et l'organisateur de la Victoire). En 1795, Lazare Carnot est Directeur jusqu'au coup d'État du 18 fructidor de l'an

¹ Abū-Muḥammad Muṣliḥ al-Dīn bin Abdallāh Shīrāzī, ou Saadi, est un poète et conteur persan du XIII^e siècle.

² Régime politique français d'octobre 1795 à novembre 1799 : le pouvoir exécutif et les ministres sont répartis entre cinq directeurs ou chefs de gouvernement, le siège du Directoire est au palais du Luxembourg, actuel Sénat.

³ La Terreur est une période de la révolution française d'environ deux années (1793-1794) après la chute de la royauté en août 1792.

⁴ Gaspard Monge (1746-1818), mathématicien et homme politique français.

⁵ Mis en place par la Convention, pour faire face aux dangers menaçant la République.

V⁶ (septembre 1797) pendant lequel il s'exilera. Rappelé par Napoléon Bonaparte, alors Premier consul, il sera Ministre de la guerre en 1800 mais sera dans l'opposition politique durant le règne de Napoléon 1^{er}, puisque contre le consulat à vie et même l'Empire. Au printemps 1815, au retour de Napoléon, il sera Ministre de l'intérieur le temps des Cents-Jours⁷. Au début de la Restauration⁸, Lazare Carnot est banni comme régicide, il vit en Pologne puis en Allemagne où il meurt en 1823 [3].



Figure 1 : Lazare Carnot peint par Louis-Léopold Boilly⁹ en 1813, le palais du petit-Luxembourg (en 2015) où est né Sadi Carnot, sources [4,5]

1.2 - Enfance et études (1797-1817)

Lorsque son père Lazare Carnot doit s'expatrier (1797-1800), le jeune Sadi vit avec sa mère à Saint-Omer (Pas-de-Calais). Son frère Hippolyte y naît en avril 1801 (section 3 - La famille Carnot). À partir de 1807, Lazare Carnot devient le professeur de ses deux fils, leur enseignant les mathématiques, les sciences, les langues et la musique.

Âgé de 15 ans, en 1811, Sadi Carnot entre au lycée Charlemagne¹⁰ à Paris. Il intègre la classe préparatoire de Louis Bourdon¹¹, pour préparer le concours de l'École polytechnique¹². En juin 1812 Sadi a 16 ans, l'âge minimum requis pour se présenter au concours, ce qu'il fait en août. Il est reçu 24^e sur 179 et incorporé dans la seconde division.

Au cours de sa première année à Polytechnique (1812-1813), Sadi Carnot a pour professeurs des grands noms comme Reynaud¹³ pour l'analyse, Poisson¹⁴ pour la mécanique, Hachette¹⁵ pour la

⁶ Opération politique sous le Directoire menée par trois directeurs républicains contre les royalistes devenus majoritaires aux conseils législatifs.

⁷ 1^{er} mars - 7 juillet 1815, reconquête du pouvoir par Napoléon après son abdication d'avril 1814 et son exil sur l'île d'Elbe.

⁸ Période de la restauration de la Monarchie en France à la chute de l'Empire.

⁹ Louis-Léopold Boilly (1761-1845), peintre et graveur français.

¹⁰ Lycée Charlemagne depuis 1802, anciennement *École centrale de la rue Saint-Antoine* (depuis 1797) et avant la révolution, *Maison professe des Jésuites*.

¹¹ Pierre Louis Marie Bourdon (1779-1854), mathématicien français, polytechnicien (1796), docteur ès sciences

¹² L'École polytechnique a été fondée en 1794 par la Convention nationale sous le nom d'*École centrale des travaux publics*, puis militarisée en 1804 par Napoléon 1^{er}.

¹³ Antoine André Louis Reynaud (1771-1844), mathématicien français.

¹⁴ Siméon Denis Poisson (1781-1842) mathématicien, géomètre et physicien français.

¹⁵ Jean Nicolas Pierre Hachette (1769-1834), mathématicien français, professeur à l'École polytechnique adjoint de Gaspard Monge au département de géométrie descriptive.

géométrie descriptive, Thénard¹⁶ pour la chimie générale et appliquée, Hassenfratz¹⁷ pour la physique et Arago¹⁸ pour le calcul infinitésimal et la théorie des machines. Citons également les répétiteurs Petit¹⁹ pour la physique et Dulong²⁰ pour la chimie, dont il utilisa ultérieurement les travaux, il citera par trois fois leurs expériences dans son ouvrage.



Figure 2 : Sadi Carnot en uniforme de polytechnicien peint par Louis-Léopold Boilly en 1813, source [6]

L'École polytechnique est une école militaire, et durant cette première année les armées impériales subissent des revers qui ne semblent pas affecter les enseignements. Cependant, lors de la deuxième année (1813-1814), les élèves ont été intégrés dans trois compagnies du corps d'artillerie de la garde nationale, les enseignements étant progressivement interrompus. Les 29 et 30 mars 1814, Sadi Carnot est caporal de compagnie, et a alors sa probable seule expérience de bataille dans la défense du fort de Vincennes contre les forces européennes alliées contre l'armée impériale française²¹. Les enseignements ont repris en avril 1814.

Le 12 octobre 1814, Sadi Carnot est déclaré admissible dans les services publics. Il est le 10^e de la liste générale des 65 élèves qui restaient dans sa promotion. Classé 5^e de la liste particulière des dix élèves admis dans le génie militaire comme élèves sous-lieutenants à l'École d'application de l'artillerie et du génie de Metz, École militaire et d'application de l'École polytechnique²² où il entre fin 1814. Sa sortie de cette école est marquée par l'obtention du brevet de lieutenant en

¹⁶ Louis Jacques Thénard (1777-1857), chimiste français, professeur au collège de France, à l'École polytechnique et à la faculté des sciences de Paris.

¹⁷ Jean-Henri Hassenfratz (1755-1827), premier professeur de physique de l'École polytechnique.

¹⁸ François Arago (1786-1853), astronome, physicien et homme d'état français, membre de l'Académie des sciences et professeur à l'École polytechnique.

¹⁹ Alexis Thérèse Petit (1791-1820), physicien français, docteur ès sciences, il remplacera Hassenfratz en 1814, connu pour ses travaux sur la chaleur.

²⁰ Pierre Louis Dulong (1785-1838), chimiste et physicien français, auteur de travaux sur la chaleur spécifique, la dilatation et l'indice de réfraction des gaz.

²¹ Le 30 mars 1814, la bataille de Paris est l'ultime bataille de la campagne de France qui verra la défaite française et l'abdication de Napoléon 1^{er}.

²² L'École d'application de l'artillerie et du génie a été créée en 1794 par le Comité de salut public sur proposition de Lazare Carnot, fusions de l'école royale d'artillerie de Metz et de l'école royale du génie de Mézières.

second au 2^e régiment de sapeur le 2 avril 1817. Après un congé de trois mois, prolongé jusqu'au 15 octobre 1817, Sadi Carnot commence alors sa carrière militaire, il a 21 ans.

1.3 - Carrière militaire (1817-1828)

La disgrâce de son père, chef républicain exilé, lui donne peu de perspectives dans sa carrière militaire. Il est alors capitaine du génie et inspecte des fortifications, trace des plans et rédige de nombreux rapports. En septembre 1818, Sadi Carnot a 22 ans et bénéficie d'un congé de six mois pour préparer l'examen d'entrée dans un d'un corps royal d'état-major à Paris.

Par ordonnance du 20 janvier 1819, Sadi Carnot est admis à l'état-major de Paris, avec le grade de lieutenant. Placé en disponibilité, il perçoit les deux tiers de la solde au titre de travailleur scientifique. Installé à Paris, il engrange des connaissances dans les domaines les plus variés. Ainsi, il fréquente le Jardin des plantes, la Bibliothèque du roi, le Musée du Louvre, le Théâtre italien de Paris, tout en suivant les cours de la Sorbonne et du Collège de France. Il est également élève au Conservatoire national des arts et métiers²³ où Clément-Desormes²⁴ dispense un cours de chimie appliquée aux arts et Say²⁵ un cours d'économie industrielle. Sadi Carnot se passionne pour l'économie politique, la musique, et pratique même la gymnastique et la danse, mais il s'intéresse également aux problèmes industriels, visite des ateliers et des usines, étudie la théorie des gaz et les dernières théories d'économie politique. Il laisse des propositions détaillées sur les problèmes courants comme les taxes, les mathématiques ou les arts.



Figure 3 : Jean-Baptiste Say, professeur à la chaire d'économie industrielle du Conservatoire nationale des arts et métiers, source Wiki Commons

À cette époque il fréquente un cercle de tendance radicale et républicaine, ses amis les plus proches sont alors Nicolas Clément, dont il suit les enseignements au CNAM, et Charles Desormes, beau-père de Nicolas. Chimistes industriels, ce sont des hommes de science. Rédacteurs d'un *Mémoire sur la théorie des machines à feu*, ils sont les seuls physiciens avec lesquels Sadi Carnot prend réellement contact avant de rédiger ses « *Réflexions sur la puissance motrice du feu*

²³ CNAM : Fondé en octobre 1794 pour « perfectionner l'industrie nationale », il est avec l'École polytechnique et l'École normale supérieure, les trois créations de la Révolution française ayant pour but de promouvoir les sciences et les techniques.

²⁴ Nicolas Clément ou Clément-Desormes (1779-1841), physicien et chimiste français.

²⁵ Jean-Baptiste Say (1767-1832), industriel du coton, et économiste, professeur à la chaire d'économie industrielle au CNAM.

et sur les machines propres à développer cette puissance ». Une de leurs expériences ainsi qu'une de leur loi sont d'ailleurs citées dans l'ouvrage de Sadi Carnot. Dans une note de bas de page, il mentionnera un principe développé par Nicolas Clément dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences et jamais imprimé dont il a eu connaissance grâce à la complaisance de l'auteur.

En juin 1821, Sadi Carnot, qui a alors 25 ans, rend visite à son père à Magdebourg en Allemagne, le ministère de la Guerre lui ayant accordé un congé sans solde. La première machine à vapeur avait été construite, à Magdebourg en 1818, c'est donc durant ce séjour qu'il commence à s'intéresser aux machines thermiques. À son retour à Paris, il entreprend l'écriture des réflexions qu'il publiera dans son ouvrage. Ses premiers travaux importants datent des années 1822 et 1823. En août 1823, son père décède en exil, son frère Hippolyte, alors âgé de 22 ans, le rejoint à Paris. Hippolyte Carnot prend part aux travaux de son frère aîné en l'aidant à rédiger ses écrits afin de s'assurer qu'ils seraient compris par des personnes vouées à d'autres études.

En 1824, à 28 ans, il publie à compte d'auteur sa célèbre et unique publication : « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* ».

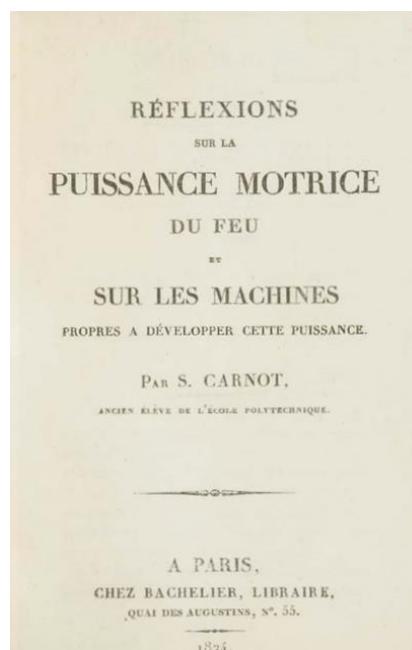


Figure 4 : Édition originale de « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* »

Durant les années 1824 et 1825, Sadi Carnot, toujours lieutenant d'état-major, réalise des travaux topographiques. En décembre 1826, il obtient un congé de trois mois à demi-solde. En mars 1827, il redemande un congé, faisant valoir son peu d'aptitude au service dans l'infanterie. Il est alors réintégré dans le génie et maintenu en congé jusqu'en septembre mais sans solde. Après une réorganisation de l'état-major, il est envoyé en Côte-d'Or et, en septembre 1827, il est promu au grade de capitaine en second du génie.

En avril 1828, Sadi Carnot a 32 ans, et propose sa démission de l'armée : acceptée en mai. La carrière militaire de Sadi depuis sa sortie de l'École de Metz en 1817, se résume à quinze mois de service militaire actif, y compris les levés topographiques.

1.4 - La vie civile (1828-1832)

Sadi Carnot peut alors rejoindre Paris et reprendre sa vie d'études et de recherches personnelles. En 1831, il entreprend d'étudier les propriétés physiques des gaz et des vapeurs, et spécialement la relation entre leur température et leur pression.

L'héritage de son grand-père maternel permet à Sadi Carnot de vivre comme un modeste rentier. Interrogé sur sa profession par Fourcy²⁶ rédigeant son ouvrage *Histoire de l'École polytechnique* (1828), Sadi Carnot se déclare *constructeur de machines à vapeur* sans que pour autant son nom soit mentionné dans aucune liste de fabricants. Sadi Carnot n'a jamais déposé de brevet, il ne sollicita pas de chaire ou de poste d'examineur à l'École centrale des arts et manufactures²⁷ chargée de former des ingénieurs pour l'industrie privée. En août 1830, l'Association polytechnique des anciens élèves de l'École est créée, Sadi Carnot y adhère. En août 1831, à 35 ans, il reprend ses travaux sur les propriétés physiques des gaz suite à la publication des deux mémoires de Dulong²⁸. Cette même année, il tombe gravement malade, il a un accès de fièvre scarlatine avec des crises de délire.



Figure 5 : Sadi Carnot portrait de Despoix en 1830, source [7]

En juin 1832, son état de santé ne lui permet pas de venir à la séance de l'Association polytechnique. Son frère Hippolyte note dans sa notice bibliographique : « *l'application excessive à laquelle il se livrait le rendit malade vers la fin de juin 1832* ». Le 3 août Sadi Carnot est admis à la maison de santé de Jean-Étienne Esquirol²⁹ à Ivry, celui-ci diagnostique un trouble d'humeur, la manie, autrement dit un état mental caractérisé par des degrés d'humeur, d'irritation ou d'énergie anormalement élevés. Sadi Carnot meurt à la maison de santé d'Ivry trois semaines après son entrée, le registre indique '*guéri de sa manie, mort le 24 août 1832 du choléra*', dont une épidémie sévissait alors sur Paris. Le décès est déclaré le jour même à la mairie d'Ivry par l'économe de la maison de santé, son frère déclare également le décès à la mairie du 12^e arrondissement. Les obsèques civiles sont célébrées dans des conditions proches de l'anonymat, Hippolyte ayant fait publier un faire-part très laconique n'indiquant ni la date ni le lieu des obsèques. Sadi Carnot est enterré au cimetière ancien d'Ivry-sur-Seine.

Sadi Carnot meurt donc à 36 ans, sans descendance. Son frère aura une carrière politique et une descendance célèbre (section 3 - La famille Carnot).

²⁶ Ambroise Fourcy (1818-1842), bibliothécaire et secrétaire du Conseil d'administration de l'École polytechnique.

²⁷ Plus connue sous le nom d'École centrale de Paris, créée en 1829.

²⁸ Lus en juin 1828 et publiés en 1831 dans le Tome X des Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France :

- Recherches sur la chaleur spécifique des fluides élastiques
- Recherches sur la force élastique de la vapeur d'eau

²⁹ Jean-Étienne Esquirol (1772-1840), aliéniste français, père de l'organisation de la psychiatrie française.

2 – Les bases de la thermodynamique [1,2,7]

Dans sa courte vie, Sadi Carnot ne publia que le seul livre « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* », qui s'avéra être un livre très important dans l'histoire de la physique.

Cette brochure de 118 pages (figure 4), publiée en 1824 aux frais de son auteur et tirée à 600 exemplaires, représente l'essentiel de l'œuvre scientifique de Sadi Carnot, qui a alors 27 ans. Au moment de sa publication, le livre est ignoré des milieux académiques. Il sera sorti de l'oubli par Émile Clapeyron qui attire l'attention sur le travail de Sadi Carnot lors de la publication de son « *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur* » en 1834. Le livre de Sadi Carnot est alors publié depuis dix ans et son auteur est mort depuis deux ans.

2.1 - La machine à vapeur et le contexte des travaux de Sadi Carnot

Les premières machines à vapeur sont utilisées au XVIII^e siècle essentiellement pour le pompage de l'eau des mines, elles sont lentes et peu régulières. La vapeur était alors utilisée pour évacuer l'air d'un cylindre qui ensuite était refroidi afin d'en obtenir la condensation. Ensuite la pression atmosphérique faisait redescendre le piston. Dans les années 1760, pour réduire le gaspillage de chaleur lié au réchauffement et au refroidissement alternatif du cylindre, James Watt³⁰ proposa une machine constituée d'un cylindre principal maintenu chaud en continu et d'un cylindre froid séparé (condenseur) pour condenser la vapeur. L'air chaud, avec une pression supérieure à celle de l'atmosphère, provoquait la montée du piston. Elle était ensuite admise dans le condenseur où, grâce à sa condensation en eau, s'engendrait une dépression induisant la chute du piston. En effet, à l'époque de Sadi Carnot, au début du XIX^e siècle, la machine à vapeur est déjà très perfectionnée et les marges d'amélioration basées uniquement sur des perfectionnements mécaniques sont assez étroites. Une optimisation supplémentaire ne peut être obtenue que par un vrai saut de qualité dans la compréhension des principes fondamentaux sous-jacents le fonctionnement des machines thermiques. Beaucoup de scientifiques se penchent sur la machine à vapeur et, déjà en 1817, Joseph Fourier³¹ pense que la chaleur rayonnante obéit à une loi sinusoidale d'émission ; sans cette loi, démontre-t-il, il faudrait admettre la possibilité du mouvement perpétuel. Sadi Carnot utilise également ce raisonnement dans son ouvrage pour énoncer le théorème du rendement maximum (section 2.4).

La machine à vapeur, maillon indispensable de l'industrie de ce début du XIX^e siècle, est donc au centre de nombreux travaux dans le but d'en améliorer l'efficacité. Sadi Carnot, en physicien, souhaite en établir les fondements physiques. Depuis Lavoisier³² et encore en 1820, la chaleur est considérée comme un fluide, impondérable et indestructible, dont l'état est mesuré par la température et qui peut s'écouler d'un corps chaud vers un corps froid. S'appuyant encore sur la théorie du fluide calorique, Sadi Carnot prend en considération la pression et la température de la vapeur et comprend l'impossibilité de réaliser une machine thermique fonctionnant avec une seule

³⁰ James Watt (1736-1819), ingénieur écossais dont les recherches sur la machine à vapeur ont été essentielles dans l'évolution industrielle. En hommage à ses travaux, l'unité de puissance porte son nom, symbole W.

³¹ Joseph Fourier (1768-1830), mathématicien et physicien français, professeur à l'École polytechnique, membre de l'Académie des sciences, il donna son nom aux séries trigonométriques convergentes et à la transformation, méthode de calcul qui permet le passage réversible d'une fonction à la série trigonométrique correspondante.

³² Antoine Lavoisier (1743-1794), chimiste, philosophe et économiste français, considéré comme un des pères de la chimie moderne. Son rôle de « fermier général » (gestionnaire de l'impôt), le fera accuser de spéculation contre les intérêts des citoyens, il sera condamné et guillotiné.

source de chaleur : c'est, en quelque sorte, la première ébauche de ce qui est maintenant appelé second principe de la thermodynamique. Pour fonctionner une machine thermique dispose d'une source chaude et d'une source froide, la chaleur communiquée à la vapeur par la source chaude est partiellement restituée à la source froide tout en produisant du travail. Sadi Carnot formule un concept de transformation réversible, comme une séquence de transformations infinitésimales, qui anticipe le concept de transformation quasi-statique encore utilisé dans les cours de thermodynamique. Il en déduit le rendement maximal d'une machine thermique idéale. Celui-ci correspond au rendement d'une machine fonctionnant sur un cycle de quatre transformations réversibles : deux transformations isothermes, pendant chacune desquelles la machine échange de la chaleur de façon réversible avec l'un des deux réservoirs en restant tout le temps à la même température que celui-ci ; deux transformations adiabatiques au long desquelles la machine change de température restant tout le temps thermiquement isolée (i.e. sans échanger de la chaleur). C'est le cycle qui depuis porte son nom et que l'on étudie encore aujourd'hui.

Dans ses notes posthumes publiées en 1878, Sadi Carnot avait repris et amendé plusieurs points des « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* ».

2.2 - Notes posthumes [13]

Ce n'est qu'en 1863 et 1869, alors que Sadi Carnot est mort depuis plus de trente ans, que son frère cadet, Hippolyte, rapporte pour la première fois quelques détails de la vie et la carrière de son frère. En 1872, « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* » est réédité dans les *Annales scientifiques de l'École normale supérieure* [14]. L'intérêt alors porté aux travaux de Sadi Carnot incite probablement Hippolyte à présenter ses souvenirs sous une forme plus élaborée. En 1878, une nouvelle édition du mémoire de Sadi Carnot est publiée avec addition de notes trouvées dans les papiers de l'auteur, et le frère y ajoute une *Notice biographique sur Sadi Carnot*. Un exemplaire de cette nouvelle édition ainsi que le manuscrit de *Réflexions*, suivies de quatre cahiers de notes dites posthumes sont déposés à la bibliothèque de l'Institut. La lettre d'Hippolyte au Président de l'Académie des sciences est reproduite dans les *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 1878, deuxième semestre, page 967-969 (figure 8) [15].

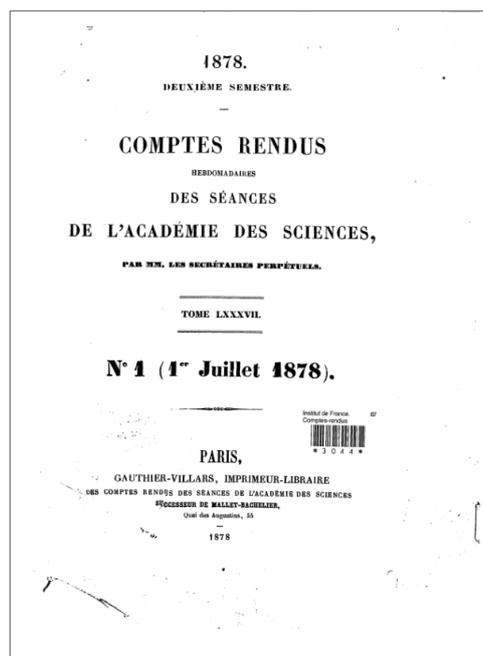


Figure 6 : Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 1878, deuxième semestre, source [15]

Grâce à la publication de ses manuscrits³³, on sait que Sadi Carnot, à la fin de sa vie, était en train de revoir de façon critique l'idée de conservation du fluide calorique. Il voulait y substituer celle qu'on peut considérer, à tous les effets, une formulation restreinte du principe de conservation de l'énergie. Dans ses notes il écrit : « La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt que le mouvement, qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules des corps. Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a, en même temps, production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite. Réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de puissance motrice ». Dans un manuscrit intitulé « *Recherche d'une formule propre à représenter la puissance motrice de la vapeur d'eau* », Sadi Carnot estime la constante de proportionnalité entre chaleur et énergie mécanique à 2 % près de la valeur mesurée par James Prescott Joule³⁴ en 1843. Tout cela montre que Carnot, dans ses écrits restés inédits jusqu'en 1878, avait formulé un antécédent du premier principe de la thermodynamique.

On manque d'éléments pour savoir jusqu'où auraient abouti les recherches de Carnot, ni s'il aurait poursuivi cette critique de la notion de fluide calorique jusqu'à arriver à sa publication. Ce qui est sûr est que, après sa mort, il faudra attendre une vingtaine d'années pour que l'équivalence entre chaleur et travail mécanique soit formulée à la suite des recherches expérimentales et théoriques menées par Mayer³⁵ (1842), Joule (1843), Colding³⁶ (1843), et Helmholtz³⁷ (1847). Ce que Carnot cherchait, sans pourtant arriver à le formuler explicitement dans les notes qui nous sont parvenues, est la notion même d'énergie, cette grandeur qui se conserve et qui caractérise de façon unique l'état d'un système thermodynamique et dont le changement résulte d'un échange de chaleur, ou de travail, entre ce système et son environnement. Dans la notion moderne, que l'on doit aux successeurs de Carnot, cette grandeur, est l'*énergie interne* « U », selon la notation introduite par Clausius.

Néanmoins, même si Sadi Carnot ne laisse pas son nom au premier principe de la thermodynamique, les historiens contemporains, notamment Thomas Kuhn³⁸, ont souligné l'importance que la lecture de son œuvre a exercé sur son époque. Ses *Réflexions* ont été, sans doute, l'une des sources de ce climat culturel et scientifique qui, selon Kuhn, mena à « l'invention » du concept moderne d'énergie.

2.4 - La publication de Sadi Carnot [14,16]

Voici les premiers paragraphes de l'ouvrage de Sadi Carnot [14] :

Personne n'ignore que la chaleur peut être la cause du mouvement, qu'elle possède même une grande puissance motrice : les machines à vapeur, aujourd'hui si répandues, en sont une preuve parlant à tous les yeux.

C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension

³³ Notamment des « Notes sur les mathématiques, la physique et autres sujets ». Voir à ce propos l'édition, S. Carnot, « *Réflexions Sur La Puissance Motrice Du Feu* », Édition critique avec Introduction et Commentaire augmentée de documents d'archive et de divers manuscrits de Carnot par Robert FOX (Vrin, 1978).

³⁴ James Prescott Joule (1818-1889), physicien anglais, dont l'unité d'énergie porte le nom, symbole J.

³⁵ Julius Robert Von Mayer (1814-1878), médecin et physicien wurtembergeois (Allemagne). En 1871, il reçut la médaille Copley, attribuée par la Royal Society de Londres, pour ses travaux sur la thermodynamique.

³⁶ Ludwig August Colding (1815-1888), ingénieur et physicien danois.

³⁷ Hermann von Helmholtz (1821-1894), physicien prussien.

³⁸ T. S. Kuhn, « Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery », in *The Essential Tension* (University of Chicago Press, Chicago, 1977), pp. 66-104.

des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courants d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie ; enfin les tremblements de terre, les éruptions volcaniques reconnaissent aussi pour cause la chaleur.

C'est dans cet immense réservoir que nous pouvons puiser la force mouvante nécessaire à nos besoins ; la nature, en nous offrant de toutes parts le combustible, nous a donné la faculté de faire naître en tous temps et en tous lieux la chaleur et la puissance motrice qui en est la suite. Développer cette puissance, l'approprier à notre usage, tel est l'objet des machines à feu.

L'étude de ces machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours ; elles paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé.

Déjà la machine à feu exploite nos mines, fait mouvoir nos navires, creuse nos ports et nos rivières, forge le fer, façonne les bois, écrase les grains, file et ourdit nos étoffes, transporte les plus pesants fardeaux, etc. ; elle semble devoir un jour servir de moteur universel et obtenir la préférence sur la force des animaux, les chutes d'eau et les courants d'air. Elle a, sur le premier de ces moteurs, l'avantage de l'économie ; sur les deux autres, l'avantage inappréciable de pouvoir s'employer en tous temps et en tous lieux, et de ne jamais souffrir d'interruption dans son travail.

Si quelque jour les perfectionnements de la machine à feu s'étendent assez loin pour la rendre peu coûteuse en établissement et en combustible, elle réunira toutes les qualités désirables, et fera prendre aux arts industriels un essor dont il serait difficile de prévoir toute l'étendue.

Non seulement, en effet, un moteur puissant et commode, que l'on peut se procurer ou transporter partout, se substitue aux moteurs déjà en usage, mais il fait prendre aux arts où on l'applique une extension rapide, il peut même créer des arts entièrement nouveaux.

L'ouvrage publié en 1824 était un fascicule de 118 pages qui proposait un texte continu sans chapitre ou partie distincte, et comportait cinq figures, quelques tables, de rares équations qui pouvaient être insérées en notes de bas de pages, ces dernières étant très nombreuses. Le style d'écriture est, à l'image des lignes reproduites ci-dessus, assez clair. Cependant les raisonnements exposés ne sont pas si aisés à comprendre, très peu de mise en équation et aucun schéma ne soutiennent les propos. Le vocabulaire est celui des physiciens du XIX^e siècle.

Dans les premières pages, Sadi Carnot expose son objectif : mettre en place une théorie pour les machines de feu avec des principes applicables selon le contexte comme elle existe déjà, pour les machines actionnées autrement que par la chaleur. Un autre extrait :

Pour envisager dans toute sa généralité le principe de la production du mouvement par la chaleur, il faut le concevoir indépendamment d'aucun mécanisme, d'aucun agent particulier ; il faut établir des raisonnements applicables, non seulement aux machines à vapeur, mais à toute machine à feu imaginable, quelle que soit la substance mise en œuvre et quelle que soit la manière dont on agisse sur elle.

Les machines qui ne reçoivent pas leur mouvement de la chaleur, celles qui ont pour moteur la force des hommes ou des animaux, une chute d'eau, un courant d'air, etc., peuvent être étudiées jusque dans leurs moindres détails par la théorie mécanique. Tous les cas sont prévus, tous les mouvements imaginables sont soumis à des principes généraux solidement établis et applicables en toute circonstance. C'est là le caractère d'une théorie complète.

Une semblable théorie manque évidemment pour les machines à feu. On ne la possédera que lorsque les lois de la Physique seront assez étendues, assez généralisées, pour faire connaître à l'avance tous les effets de la chaleur agissant d'une manière déterminée sur un corps quelconque.

Sadi Carnot introduit son propos par le concept de la chaleur comme agent moteur sans préoccupation de sa nature, de ses effets chimiques ou physiologiques, ni des conditions de sa transmission ou encore du refroidissement ou du réchauffement des corps. L'idée fondamentale de Carnot est d'extraire de la puissance motrice en utilisant la chute du fluide calorique depuis les corps chauds vers les corps froids. En analogie avec une chute d'eau depuis une certaine hauteur, la chute du calorique se ferait depuis une différence de température entre le corps chaud et le corps froid. La conséquence de cette idée, exposée dans les premières pages du mémoire, est donc que la production de puissance motrice n'est possible que si on dispose de deux corps l'un froid et l'autre chaud. Ainsi s'exprime Sadi Carnot :

La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, *mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid*, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit, par une action chimique, telle que la combustion, ou par toute autre. Nous verrons bientôt que ce principe est applicable à toute machine mise en mouvement par la chaleur.

[...]

On a remarqué plus haut ce fait évident par lui-même, ou qui du moins devient sensible dès que l'on réfléchit aux changements de volume occasionnés par la chaleur : *partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice*. Réciproquement, partout où l'on peut consommer de cette puissance, il est possible de faire naître une différence de température [...]

Carnot formule un théorème relatif à la puissance motrice maximale développée par la chaleur, théorème de rendement maximal des machines thermiques à qui son nom sera attribué par la suite. Pour Sadi Carnot, ainsi que pour la plupart de ses contemporains, il n'y a pas de doute sur le fait qu'une production illimitée de puissance motrice, soit un mouvement perpétuel, serait une absurdité. Cela le guide vers la recherche de principes premiers aptes à identifier le maximum de puissance motrice qu'une machine *parfaite* (aujourd'hui on dirait plutôt *idéale*) pourrait produire en présence d'une certaine différence de température entre le corps chaud depuis lequel la chaleur (le fluide calorique) tomberait et le corps froid qui la recevrait. Il écrit :

[...] ce serait là, non-seulement le mouvement perpétuel, mais une création indéfinie de force motrice sans consommation ni de calorique, ni de quelque autre agent que ce soit. Une semblable création est tout à fait contraire aux idées reçues jusqu'à présent, aux lois de la Mécanique et de la saine Physique ; elle est inadmissible. On doit donc conclure que *le maximum de puissance motrice résultant de l'emploi de la vapeur est aussi le maximum de puissance motrice réalisable par quelque moyen que ce soit*. Nous donnerons, au reste, bientôt une seconde démonstration plus rigoureuse de ce théorème.

[...]

Ainsi nous sommes conduits à établir la proposition générale que voici :

La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait, en dernier résultat, le transport du calorique.

Il faut sous-entendre ici que chacune des méthodes de développer la puissance motrice atteint la perfection dont elle est susceptible. Cette condition se trouvera remplie si, comme

nous l'avons remarqué plus haut, il ne se fait dans les corps aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume, ou, ce qui est la même chose autrement exprimée, s'il n'y a *jamais* de contact entre des corps de températures sensiblement différentes.

La phrase finale citée ci-dessus est très importante pour traduire le langage des *Réflexions* en termes modernes. Sadi Carnot est en train de dire que, tout au long du cycle de fonctionnement, la machine *parfaite* n'entrera en contact qu'avec des corps qui se trouvent à sa même température. Il dit aussi que tout changement de température de la machine ne pourra qu'avoir lieu à cause d'une compression ou d'une détente. Cela signifie que tout échange de chaleur avec les sources froide et chaude devra avoir lieu en maintenant la température de la machine strictement égale à celle de la source : aujourd'hui on appelle cette opération une transformation isotherme. De même, le changement de température de la machine depuis celle de la source froide à celle de la chaude et vice-versa, devra avoir lieu par compression (détente) dans un état d'isolement thermique : ce qu'aujourd'hui on appelle des transformations adiabatiques.

Dans le deuxième quart de son ouvrage, il décrit de façon détaillée le cycle idéal de fonctionnement de la machine *parfaite*, aujourd'hui appelée *machine de Carnot*. Il s'agit d'un moteur thermique capable d'échanger de la chaleur avec les corps A et B, de températures différentes en produisant le maximum de puissance motrice. La figure I de la publication (figure 7) permet de suivre de raisonnement de Carnot dont l'extrait suit :

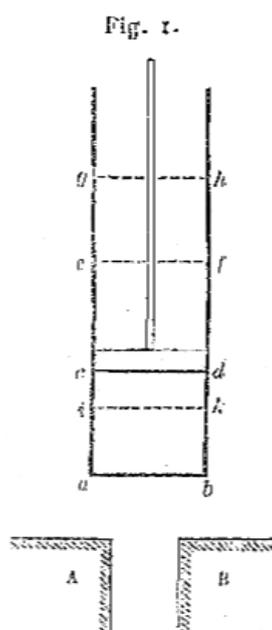


Figure 7 : Fig. I de l'ouvrage de Sadi Carnot, source Wiki Commons

[...] imaginons un fluide élastique, de l'air atmosphérique, par exemple, renfermé dans un vaisseau cylindrique $abcd$ (fig. I), muni d'un diaphragme mobile ou piston cd ; soient en outre les deux corps A, B, entretenus chacun à une température constante, celle de A étant plus élevée que celle de B ; figurons-nous maintenant la suite des opérations qui vont être décrites :

1° Contact du corps A avec l'air renfermé dans la capacité $abcd$, ou avec la paroi de cette capacité, paroi que nous supposerons transmettre facilement le calorique. L'air se trouve par ce contact à la température même du corps A ; cd est la position actuelle du piston.

2° Le piston s'élève graduellement et vient prendre la position ef . Le contact a toujours lieu entre le corps A et l'air, qui se trouve ainsi maintenu à une température constante pendant

la raréfaction. Le corps A fournit le calorique nécessaire pour maintenir la constance de température.

3° Le corps A est éloigné, et l'air ne se trouve plus en contact avec aucun corps capable de lui fournir du calorique ; le piston continue cependant à se mouvoir, et passe de la position *ef* à la position *gh*. L'air se raréfie sans recevoir de calorique, et sa température s'abaisse. Imaginons qu'elle s'abaisse ainsi jusqu'à devenir égale à celle du corps B : à ce moment le piston s'arrête et occupe la position *gh*.

4° L'air est mis en contact avec le corps B ; il est comprimé par le retour du piston, que l'on ramène de la position *gh* à la position *cd*, Cet air reste cependant à une température constante, à cause de son contact avec le corps B, auquel il cède son calorique.

5° Le corps B est écarté, et l'on continue la compression de l'air, qui, se trouvant alors isolé, s'élève de température. La compression est continuée jusqu'à ce que l'air ait acquis la température du corps A. Le piston passe pendant ce temps de la position *cd* à la position *ik*.

6° L'air est remis en contact avec le corps A ; le piston retourne de la position *ik* à la position *ef* ; la température demeure invariable.

7° La période décrite sous le n° 3 se renouvelle, puis successivement les périodes 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5, et ainsi de suite.

Dans ces diverses opérations, le piston éprouve un effort plus ou moins grand de la part de l'air enfermé dans le cylindre ; la force élastique de cet air varie, tant à cause des changements de volume que des changements de température ; mais on doit remarquer qu'à volume égal, c'est-à-dire pour des positions semblables du piston, la température se trouve plus élevée pendant les mouvements de dilatation que durant les mouvements de compression. Pendant les premiers, la force élastique de l'air se trouve donc plus grande, et par conséquent la quantité de puissance motrice produite par les mouvements de dilatation est plus considérable que celle qui est consommée pour produire les mouvements de compression. Ainsi l'on obtiendra un excédent de puissance motrice, excédent dont on pourra disposer pour des usages quelconques. L'air nous a donc servi de substance active dans la machine à feu ; nous l'avons même employé de la manière la plus avantageuse possible, car il ne s'est fait aucun rétablissement inutile d'équilibre dans le calorique.

Toutes les opérations ci-dessus décrites peuvent être exécutées dans un sens et dans un ordre inverses. Imaginons qu'après la sixième période, c'est-à-dire le piston étant arrivé à la position *ef*, on le fasse revenir à la position *ik*, et qu'en même temps on maintienne l'air en contact avec le corps A : le calorique fourni par ce corps, pendant la sixième période, retournera à sa source, c'est-à-dire au corps A, et les choses se trouveront dans l'état où elles étaient à la fin de la période cinquième. Si maintenant on écarte le corps A, et que l'on fasse mouvoir le piston de *ef* en *cd*, la température de l'air décroîtra d'autant de degrés qu'elle s'est accrue pendant la période cinquième, et deviendra celle du corps B. On peut évidemment continuer une suite d'opérations inverses de celles que nous avons d'abord décrites : il suffit de se placer dans les mêmes circonstances et d'exécuter pour chaque période un mouvement de dilatation au lieu d'un mouvement de compression, et réciproquement.

Le résultat des premières opérations avait été la production d'une certaine quantité de puissance motrice et le transport du calorique du corps A au corps B ; le résultat des opérations inverses est la consommation de la puissance motrice produite, et le retour du calorique du corps B au corps A ; de sorte que ces deux suites d'opérations s'annulent, se neutralisent en quelque sorte l'une l'autre.

Sadi Carnot démontre qu'une puissance motrice positive est développée grâce au fait que la dilatation isotherme a lieu à une température plus élevée par rapport à celle à laquelle se déroule la compression isotherme. C'est donc la différence de température entre les sources chaude et froide le paramètre qui définit la capacité de la machine à produire du travail.

La remarque soulignant que l'actionnement de la machine en sens inverse comporterait une consommation de puissance motrice égale, ainsi qu'un transfert de la même quantité de chaleur, cette fois-là du corps froid au corps chaud est très importante. Reformulée en termes modernes elle correspond à établir la réversibilité de la machine et, par conséquent, des quatre transformations dont son cycle de fonctionnement est composé : les deux isothermes et les deux adiabatiques.

Sadi Carnot continue son ouvrage sur la physique des gaz. Il démontre que tous les gaz dilatés ou comprimés d'une pression et d'un volume à une autre pression et à un autre volume à température constante, absorbent ou bien dégagent la même quantité de chaleur, extrait :

Puisque deux gaz différents, pris à la même température et sous la même pression, doivent se comporter l'un comme l'autre dans les mêmes circonstances, si on leur fait subir à tous deux les opérations ci-dessus décrites, ils devront donner naissance à des quantités de puissance motrice égales. Or cela suppose, d'après la proposition fondamentale que nous avons établie, l'emploi des deux quantités égales de calorique, c'est-à-dire cela suppose que la quantité de calorique passée du corps A au corps B est la même, soit que l'on opère sur l'un des gaz, soit que l'on opère sur l'autre.

La quantité de calorique passée du corps A au corps B est évidemment celle qui est absorbée par le gaz dans son extension de volume, ou celle que ce gaz abandonne ensuite par la compression. Nous sommes donc conduits à établir la proposition suivante :

Lorsqu'un gaz passe, sans changer de température, d'un volume et d'une pression déterminés à un autre volume et à une autre pression également déterminés, la quantité de calorique absorbée ou abandonnée est toujours la même, quelle que soit la nature du gaz choisi comme sujet d'expérience.

Il se penche également sur les chaleurs spécifiques de gaz, c'est-à-dire sur la capacité d'un gaz à accumuler de l'énergie thermique. Il établit des tables de la chaleur spécifique à *pression constante* et la chaleur spécifique à *volume constant* pour différents gaz (air atmosphérique, oxygène, azote, ...) et propose :

D'après la loi de MM. Gay-Lussac et Dalton, cette augmentation de volume serait la même pour tous les autres gaz ; d'après le théorème démontré [plus haut] la chaleur absorbée par des augmentations égales de volume est la même pour tous les fluides élastiques ; nous sommes donc conduits à établir la proposition suivante :

La différence entre la chaleur spécifique sous pression constante et la chaleur spécifique sous volume constant est la même pour tous les gaz.

Il faut remarquer ici que tous les gaz sont supposés pris sous la même pression, la pression atmosphérique, par exemple, et qu'en outre les chaleurs spécifiques sont mesurées par rapport aux volumes.

Finalement, il termine son ouvrage avec des réflexions sur les dilatations possibles de différents gaz et les températures auxquelles elles ont lieu. Il écrit :

La quantité de chaleur due au changement de volume d'un gaz est d'autant plus considérable que la température est plus élevée.

Ainsi, par exemple, il faut plus de calorique pour maintenir à 100 degrés la température d'une certaine quantité d'air dont on double le volume, que pour maintenir à 1 degré la température de ce même air pendant une dilatation absolument pareille.

Ces quantités inégales de chaleur produiraient cependant, comme nous l'avons vu, des quantités égales de puissance motrice pour des chutes égales du calorique, prises à différentes hauteurs sur l'échelle thermométrique ; d'où l'on peut tirer la conclusion suivante :

La chute du calorique produit plus de puissance motrice dans les degrés inférieurs que dans les degrés supérieurs.

Ainsi une quantité donnée de chaleur développera plus de puissance motrice en passant d'un corps maintenu à 1 degré à un autre maintenu à zéro, que si ces deux corps eussent possédé les degrés 101 et 100.

L'eau en tant que source de vapeur présente l'avantage de se dilater de façon importante dans une gamme de températures relativement restreinte, cependant au-dessus de 100°C, l'élévation de température même faible demande une forte augmentation de pression. Il analyse ensuite sur la possibilité d'utiliser, au lieu d'un gaz, des corps solides. Il arrive à la conclusion que ce changement ne serait pas avantageux :

Nous chercherons ici à évaluer d'une manière absolue la puissance motrice de la chaleur, et afin de vérifier notre proposition fondamentale, afin de vérifier si l'agent mis en œuvre pour réaliser la puissance motrice est réellement indifférent, relativement à la quantité de cette puissance, nous en choisirons successivement plusieurs : l'air atmosphérique, la vapeur d'eau, la vapeur d'alcool.

[...]

Les fluides élastiques, gaz ou vapeurs, sont les véritables instruments appropriés au développement de la puissance motrice de la chaleur; ils réunissent toutes les conditions nécessaires pour bien remplir cet emploi : ils sont faciles à comprimer ; ils jouissent de la faculté de se distendre presque infiniment; les variations de volume occasionnent chez eux de grands changements de température ; enfin ils sont très mobiles, faciles à échauffer et à refroidir promptement, faciles à transporter d'un lieu à un autre, ce qui donne la faculté de leur faire produire rapidement les effets que l'on attend d'eux.

On peut aisément concevoir une foule de machines propres à développer la puissance motrice de la chaleur par l'emploi des fluides élastiques ; mais, de quelque manière que l'on s'y prenne, il ne faut pas perdre de vue les principes suivants :

1° La température du fluide doit être portée d'abord au degré le plus élevé possible, afin d'obtenir une grande chute de calorique, et par suite une grande production de puissance motrice.

2° Par la même raison, le refroidissement doit être porté aussi loin que possible.

3° Il faut faire en sorte que le passage du fluide élastique de la température la plus élevée à la température la plus basse soit dû à l'extension de volume, c'est-à-dire il faut faire en sorte que le refroidissement du gaz arrive spontanément par l'effet de la raréfaction.

Sadi Carnot établit que par l'utilisation d'une grande chute de température, les moteurs à vapeur à haute pression présentent un avantage certain sur les moteurs à basse pression. Il remarque alors que cet avantage dessert l'eau pour les moteurs thermiques à venir. La grande augmentation de

pression nécessaire pour obtenir de faibles augmentations de températures au-dessus de 100 °C entraîne un fonctionnement peu possible sur l'entière gamme des températures, de celle de la combustion du charbon jusqu'à la température de condensation de l'eau. Extrait :

Le charbon étant capable de produire par sa combustion une température supérieure à 1000 degrés, et l'eau froide dont on dispose le plus ordinairement dans nos climats étant à 10 degrés environ, l'on peut se procurer facilement une chute de calorique de 1000 degrés, chute dont 120 degrés seulement sont utilisés par les machines à vapeur ; encore ces 120 degrés ne sont-ils pas mis entièrement à profit : il se fait toujours des pertes considérables, dues à des rétablissements inutiles d'équilibre dans le calorique.

Il est aisé d'apercevoir maintenant quelles sont les causes de l'avantage des machines dites à haute pression sur les machines à pression plus basse : cet avantage réside essentiellement dans la faculté de rendre utile une plus grande chute du calorique. La vapeur prenant naissance sous une pression plus forte se trouve aussi à une température plus élevée, et comme, d'ailleurs, la température de la condensation reste toujours à peu près la même, la chute du calorique est évidemment plus considérable.

Mais pour tirer des machines à haute pression des résultats vraiment avantageux, il faut que la chute du calorique y soit mise à profit le mieux possible. Il ne suffit pas que la vapeur prenne naissance à une température élevée, il faut encore que, par l'extension de son volume, elle arrive à une température assez basse. Le caractère d'une bonne machine à vapeur doit donc être non-seulement d'employer la vapeur sous une forte pression, mais à l'employer sous des pressions successives très variables, très différentes les unes des autres, progressivement décroissantes.

Sadi Carnot conclut que le moteur à air sera certainement le plus performant dans l'avenir. La note⁽¹⁾ terminant l'extrait qui suit, distingue le développement de la puissance motrice du *pyréolophore* de MM. Niépce³⁹ par le prix excessif du combustible choisi, ainsi que par des problèmes techniques liés à la combustion et à la lubrification. À ce propos Sadi Carnot note « Nous ne croyons pas ces difficultés insurmontables ». (Notons qu'entre 1806, année de la présentation du *pyréolophore*, et 1824, année de la publication de Sadi Carnot, les frères Niépce avaient continué leurs recherches en particulier sur l'injection d'essence !) ; extraits :

On a essayé à diverses reprises de faire agir la chaleur sur l'air atmosphérique pour donner naissance à la puissance motrice. Ce gaz présente, relativement à la vapeur d'eau, des avantages et des inconvénients que nous allons examiner.

1° Il présente, relativement à la vapeur d'eau, un avantage notable en ce que ayant à volume égal une capacité pour la chaleur beaucoup moindre, il se refroidirait davantage par une extension semblable au volume (ce fait est prouvé par ce que nous avons dit précédemment). Or on a vu de quelle importance il était d'occasionner, par les changements de volume, les plus grands changements possibles dans la température.

2° La vapeur d'eau ne peut être formée que par l'intermédiaire d'une chaudière, tandis que l'air atmosphérique pourrait être échauffé immédiatement par une combustion exécutée dans son sein. On éviterait ainsi une perte considérable, non-seulement dans la quantité de chaleur, mais encore dans son degré thermométrique. Cet avantage appartient

³⁹ Claude (1763-1828) et Joseph dit Nicéphore (1765-1833) Niépce, inventeurs du premier moteur à combustion interne ; Nicéphore est connu pour être l'inventeur de la photographie.

exclusivement à l'air atmosphérique ; les autres gaz n'en jouissent pas : ils seraient même plus difficiles à échauffer que la vapeur d'eau.

3° Afin de pouvoir donner à l'air une grande extension de volume, afin de produire par cette extension un grand changement de température, il serait nécessaire de le prendre d'abord sous une pression assez élevée : il faudrait donc le comprimer par une pompe pneumatique, ou par tout autre moyen avant de réchauffer. Cette opération exigerait un appareil particulier, appareil qui n'existe pas dans les machines à vapeur. Dans celles-ci, l'eau est à l'état liquide lorsqu'on la fait pénétrer dans la chaudière ; elle n'exige, pour y être introduite qu'une pompe foulante de petites dimensions.

4° Le refroidissement de la vapeur par le contact du corps réfrigérant est bien plus prompt et bien plus facile que ne peut l'être celui de l'air. À la vérité, on aurait la ressource de rejeter celui-ci dans l'atmosphère, ce qui aurait en outre l'avantage d'éviter l'emploi d'un réfrigérant dont on ne dispose pas toujours, mais il faudrait pour cela que l'extension de volume de l'air ne l'eût pas fait arriver à une pression moindre que la pression atmosphérique.

5° Un des inconvénients les plus graves de la vapeur est de ne pouvoir pas être prise à de hautes températures, sans nécessiter l'emploi de vaisseaux d'une force extraordinaire. Il n'en est pas de même de l'air, pour lequel il n'existe pas de rapport nécessaire entre la force élastique et la température. L'air semblerait donc plus propre que la vapeur à réaliser la puissance motrice des chutes du calorique dans les degrés élevés : peut-être, dans les degrés inférieurs, la vapeur d'eau est-elle plus convenable. On concevrait même la possibilité de faire agir la même chaleur successivement sur l'air et sur la vapeur d'eau. Il suffirait de laisser à l'air, après son emploi, une température élevée, et, au lieu de le rejeter immédiatement dans l'atmosphère, de lui faire envelopper une chaudière à vapeur, comme s'il sortait immédiatement d'un foyer.

L'emploi de l'air atmosphérique au développement de la puissance motrice de la chaleur présenterait, dans la pratique, des difficultés très grandes, mais peut-être pas insurmontables ; si l'on parvenait à les vaincre, il offrirait sans doute une supériorité remarquable sur la vapeur d'eau ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Parmi les tentatives faites pour développer la puissance motrice du feu par l'intermédiaire de l'air atmosphérique, on doit distinguer celles de MM. Niepce, qui ont eu lieu en France, il y a plusieurs années, au moyen d'un appareil nommé par les inventeurs *pyréolophore*. Voici en quoi consistait à peu près cet appareil : c'était un cylindre, muni d'un piston, où l'air atmosphérique était introduit à la densité ordinaire. On y projetait une matière très combustible, réduite à un grand état de ténuité, et qui restait un moment en suspension dans l'air, puis on y mettait le feu. L'inflammation produisait à peu près le même effet que si le fluide élastique eût été un mélange d'air et de gaz combustible, d'air et d'hydrogène carboné par exemple ; il y avait une sorte d'explosion et une dilatation subite du fluide élastique, dilatation que l'on mettait à profit en la faisant agir tout entière contre le piston. Celui-ci prenait un mouvement d'une amplitude quelconque, et la puissance motrice se trouvait ainsi réalisée. Rien n'empêchait ensuite de renouveler l'air et de recommencer une opération semblable à la première.

Cette machine, fort ingénieuse, et intéressante surtout par la nouveauté de son principe, péchait par un point capital : la matière dont on faisait usage comme combustible (c'était la poussière de lycopode, employée à produire des flammes sur nos théâtres) était trop chère pour que tout avantage ne disparût pas par cette cause ; et malheureusement il était difficile d'employer un combustible de prix modéré, car il fallait un corps en poudre très-fine, dont l'inflammation fût prompte, facile à propager, et laissât peu ou point de cendres.

Au lieu d'opérer comme le faisaient MM. Niepce, il nous eût semblé préférable de comprimer l'air par des pompes pneumatiques, de lui faire traverser un foyer parfaitement clos, et dans lequel on eût introduit le combustible en petites portions par un mécanisme facile à concevoir ; de lui faire développer son action dans un cylindre à piston ou dans toute autre capacité extensible ; de le rejeter

enfin dans l'atmosphère, ou même de le faire passer sous une chaudière à vapeur, afin d'utiliser la température qui lui serait restée.

Les principales difficultés que l'on eût rencontrées dans ce mode d'opération eussent été de renfermer le foyer dans une enveloppe d'une solidité suffisante, d'entretenir cependant la combustion à un état convenable, de maintenir les diverses parties de l'appareil à une température modérée, et d'empêcher les dégradations rapides du cylindre et du piston. Nous ne croyons pas ces difficultés insurmontables.

Il a été fait, dit-on, tout récemment en Angleterre des essais heureux sur le développement de la puissance motrice par l'action de la chaleur sur l'air atmosphérique. Nous ignorons entièrement en quoi ces essais ont consisté, si toutefois ils sont réels.

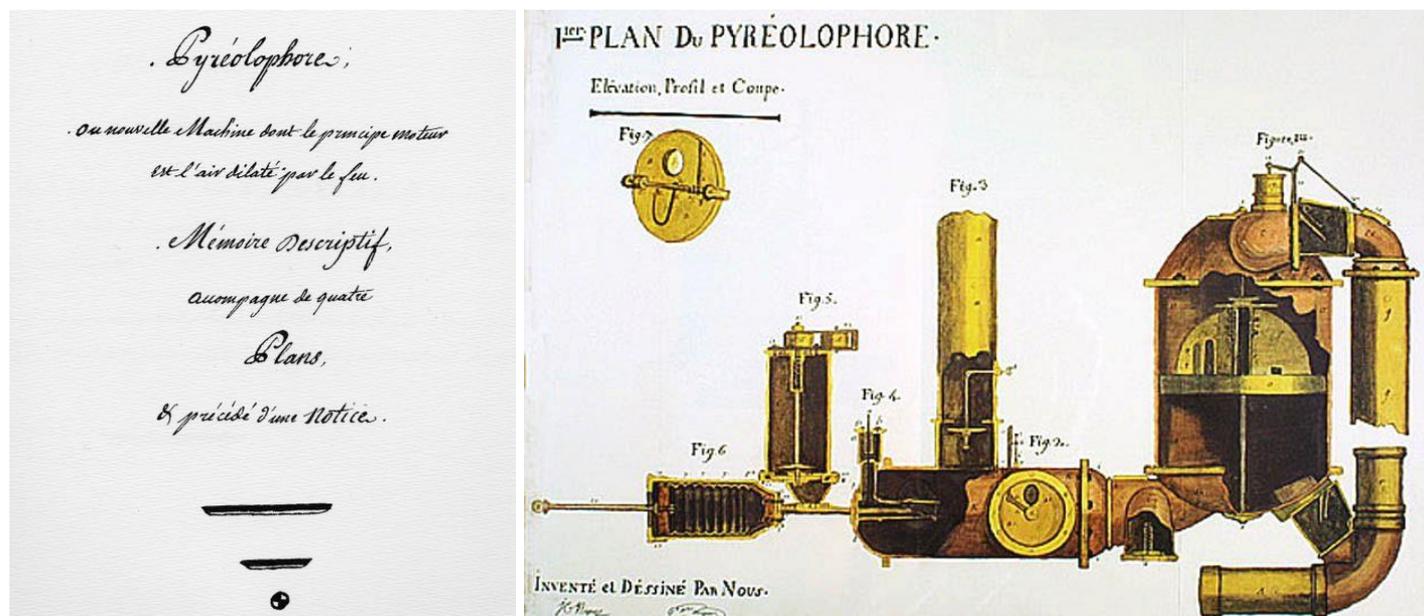


Figure 8 : Mémoire descriptif et premier plan du pyrèolophore, moteur à combustion interne conçu par Claude et Nicéphore Niépce en 1806, breveté en 1807, source [17]

2.5 - Naissance de la thermodynamique : de Sadi Carnot à Émile Clapeyron [8,9,10]

Sur le rôle de l'œuvre de Sadi Carnot dans la naissance de la thermodynamique les historiens des sciences ont à plusieurs reprises reformulé les termes du problème. Une version classique de cette narration voit Sadi Carnot comme un génial anticipateur d'une nouvelle science resté inconnu, ou même incompris ; il y a là, sans doute, un peu du mythe romantique de la solitude du génie. Néanmoins, la publication des notes posthumes avec leurs passages anticipateurs a suscité une forte impression qui ne s'est certes pas éteinte au cours du vingtième siècle. L'un des points qui restent controversés regarde l'interprétation physique à donner aux mots « chaleur », « calorique », « feu » dans l'usage qu'en fait Carnot dans les *Réflexions*. Dans cette lignée un article de Victor K. La Mer⁴⁰ a plaidé carrément pour une incompréhension des subtilités implicites du discours de Carnot. Selon La Mer, une lecture plus attentive aurait permis de voir une formulation explicite du *deuxième principe* à la condition de substituer le mot moderne « entropie » à l'usage de « calorique ». Thomas Kuhn⁴¹ a directement contesté cette thèse en admettant, tout de même, l'importance de la réception des idées de Sadi Carnot pour le développement du concept d'énergie⁴², ainsi que du deuxième principe.

⁴⁰ V. K. La Mer, Some Current Misinterpretations of N. L. Sadi Carnot Memoir and Cycle, American Journal of Physics 22, 20 (1954).

⁴¹ T. S. Kuhn, Carnot's Version of « Carnot's Cycle », American Journal of Physics 23, 91 (1955).

⁴² Voir encore le déjà cité T. S. Kuhn, « Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery », in *The Essential Tension* (University of Chicago Press, Chicago, 1977), pp. 66-104.

Restons aux faits plus connus, les travaux de Sadi Carnot ont été présentés à l'Académie des sciences en juin 1824 par Pierre-Simon Girard⁴³. Le tirage, pourtant limité à 600 exemplaires, laissa des invendus, ouvrages non ouverts puisque non coupés (les livres sont encore imprimés sur des feuilles pliées et brochées, il est nécessaire d'ouvrir les pages avec un coupe-papier au fur et à mesure de la lecture). Depuis, les *Réflexions* n'ont pas été citées par les académiciens même dans des publications qui traitaient de sujets telles les transformations isothermes, qui avaient fait l'objet du mémoire de Carnot. Néanmoins, comme l'a montré l'historien Pietro Redondi dans un article de 1976⁴⁴, le travail de Carnot connut un succès important auprès de la communauté des machines à vapeur. La qualification de « constructeur de machines à vapeur » accompagne effectivement le nom de Sadi Carnot dans une liste d'anciens polytechniciens en 1828. Entre autres, des éminents inventeurs et ingénieurs, tel Marc Seguin⁴⁵, disciple de Joseph de Montgolfier⁴⁶ et inventeur de chemins de fer, et Frédéric Reech⁴⁷, Inspecteur général du Génie maritime à Lorient, connaissaient, utilisaient et citaient les travaux de Sadi Carnot avant et indépendamment de sa redécouverte par les scientifiques à la suite des travaux de Thomson⁴⁸. L'étude de Pietro Redondi montre l'importance et la permanence des idées de Sadi Carnot pour la communauté dévouée à la recherche technologique sur les machines. Le rôle de cette permanence ne pourrait pas être ignoré pour expliquer les modalités de la redécouverte des *Réflexions* par les savants qui, passant par Regnault⁴⁹ arrivera jusqu'à William Thomson, le vrai protagoniste de la réévaluation de Sadi Carnot.

Pour dépasser une difficulté de communication entre deux communautés rien de mieux d'un traducteur, ce que dans le langage journalistique d'aujourd'hui on appellerait un « fixeur ». Émile Clapeyron⁵⁰, formé à l'École Polytechnique de 1815 à 1818 puis à l'École des mines de Paris de 1818 à 1820, part à Saint-Pétersbourg avec son condisciple Gabriel Lamé⁵¹ pour y former les élèves de l'Institut et Corps du génie des voies de communication créée en 1809 et dirigée par Augustin Bétancourt⁵². Il revient en France après juillet 1830⁵³, les relations entre la France et la Russie s'étant tendues. Émile Clapeyron se passionne pour les chemins de fer, il est professeur à l'École des mines de Saint-Étienne (1832-1834), concepteur du chemin de fer de Paris à Saint-Germain, et participe à différents tracés de lignes de chemin de fer en France. Il entre en possession d'une copie du mémoire de Sadi Carnot à l'École des mines de Saint-Étienne. En 1834, dix ans après la publication des *Réflexions*, dans son *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur* publié dans le *Journal de l'École polytechnique*, Émile Clapeyron fait valoir la nouveauté et l'importance du travail de Carnot le rendant plus accessible par des « traductions » sous forme analytique. Il introduit aussi

⁴³ Pierre-Simon Girard, (1765-1836), ingénieur et physicien français, membre de l'Académie des sciences depuis 1815.

⁴⁴ P. Redondi, Sadi Carnot et La Recherche Technologique en France de 1825 À 1850 : présentation d'un travail de recherche, *Revue D'histoire Des Sciences* 243 (1976).

⁴⁵ Marc Seguin (1786-1875), scientifique, inventeur et ingénieur français.

⁴⁶ Joseph de Montgolfier (1740-1810), industriel et inventeur, co-inventeur avec son frère Etienne de la montgolfière (1782).

⁴⁷ Frédéric Reech (1805-1884), ingénieur militaire génie maritime, mathématicien et physicien français.

⁴⁸ William Thomson (1824-1907), 1^{er} baron de Kelvin, physicien britannique qui laisse son nom à l'échelle des températures absolue.

⁴⁹ Henri Victor Regnault (1810-1878), chimiste et physicien français.

⁵⁰ Émile Clapeyron (1799-1864), enseignant à l'École nationale des ponts et chaussées à partir de 1844, élu membre de l'Académie des sciences en 1858, au fauteuil de Cauchy. Il meurt en 1864 à 65 ans.

⁵¹ Gabriel Lamé (1795-1870), mathématicien français, membre de l'Académie des sciences, professeur de physique à l'École polytechnique.

⁵² Augustin Bétancourt (Agustin de Betancourt y Molina) (1758-1824), ingénieur espagnol co-fondateur avec deux ingénieurs français (Pierre-Dominique Bazaine, 1786-1838, et Charles-Michel Potier, 1805-1855) de l'Institut et Corps du génie des voies de communication.

⁵³ 27, 28 et 29 juillet 1830, les trois glorieuses, révolution de juillet qui met en place la monarchie de juillet et sur le trône Louis-Philippe, succède à la seconde restauration.

une représentation graphique du cycle thermodynamique, dans le plan pression (p) - volume (V), qui deviendra, grâce à lui, l'une des représentations graphiques standard en thermodynamique. C'est bien sa formulation de ce théorème, qui aujourd'hui porte le nom de Carnot, qui servira à William Thomson (Lord Kelvin), en 1848, à introduire l'échelle de température absolue⁵⁴.

En fait, en Russie, Clapeyron était entré en contact avec des ingénieurs britanniques qui installaient dans ce pays la machine de Watt. Il avait ainsi découvert ce « diagramme indicateur », inventé par John Southern⁵⁵, qui permettait de mesurer la puissance d'une machine en mesurant et représentant le déplacement du piston en fonction de la pression⁵⁶. Clapeyron n'a donc pas inventé le diagramme (p , V), il a juste importé les diagrammes de Southern-Watt, jusque-là apanage des techniciens des machines, chez les scientifiques. Il devient ainsi le « fixeur » dont les deux communautés, celle des savants et celle des constructeurs, avaient besoin pour combler leur décalage vis-à-vis de la réception des idées de Sadi Carnot.



Figure 9 : Émile Clapeyron, photo non datée, source [11]



Figure 10 : « Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur » édition 1834, source [12]

Dans son ouvrage Clapeyron dès son premier chapitre introduit les travaux de Sadi Carnot :

Je citerai enfin parmi les travaux qui ont paru sur la théorie de la chaleur, un ouvrage de M. S. Carnot, publié en 1824, sous le titre de *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. L'idée qui sert de vase à ses recherches me paraît féconde et incontestable, ses démonstrations sont fondées sur l'absurdité qu'il y aurait à admettre la possibilité de créer de toutes pièces de la force motrice ou de la chaleur [...].

Il conclut son premier chapitre par :

[...] M. S. Carnot, évitant l'emploi de l'analyse mathématique, arrive par une série de raisonnements délicats et difficiles à saisir, à des résultats qui se déduisent sans peine d'une loi plus générale, que je vais chercher à établir. Mais avant d'entrer en matière, il est

⁵⁴ W. Thomson, (Lord Kelvin of Largs). on the Absolute Thermometric Scale Founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and Calculated from Regnault's Observations, *Philos Mag* 33, 313 (1848).

⁵⁵ John Southern (c.1758-1815), provenant d'une famille d'ingénieurs du Derbyshire. Employé par James Watt il co-inventa le diagramme indicateur afin d'évaluer la puissance d'une machine thermique. Cette technique restera confidentielle jusqu'aux années 30 du XIX^e siècle.

⁵⁶ R. L. s and A. Pacey, *The Measurement of Power in Early Steam-Driven Textile Mills*, *Technology and Culture* 13, 25 (1972).

utile de revenir sur l'axiome fondamental qui sert de base aux recherches de M. Carnot, et qui sera aussi mon point de départ.

Après avoir repris les explications des cycles de Carnot dans le chapitre 2 accompagné des diagrammes 1 et 2 (figure 11), le troisième chapitre commence ainsi :

Nous allons maintenant traduire analytiquement les opérations diverses que nous avons décrites dans le paragraphe précédent [...].

Sa démonstration analytique accompagnée du diagramme 3 (figure 11) est ponctuée de remarques :

Cette équation démontre en outre que *lorsqu'un gaz varie de volume sans changer de température, les quantités de chaleur absorbées ou dégagées par ce gaz sont en progression arithmétique, si les accroissements ou réductions de volume sont en progression géométrique.* M. Carnot énonce également ce résultat dans l'ouvrage cité.

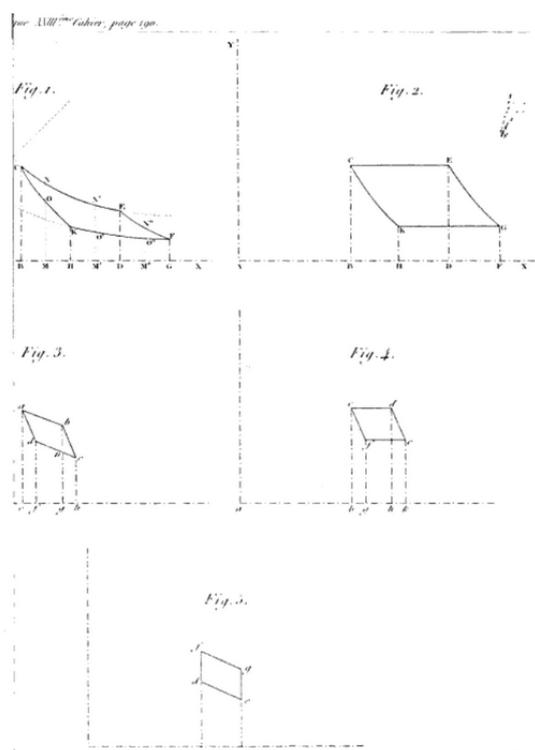


Figure 11 : Figures figurant dans *Mémoire sur la puissance motrice* d'Émile Clapeyron, source [18]

Citons encore le début du chapitre 8 d'Émile Clapeyron :

Nous n'insisterons pas davantage sur les conséquences qui résultant, pour la théorie de la chaleur, des résultats énoncés dans ce Mémoire : nous croyons utile d'ajouter quelques mots sur l'emploi de la chaleur comme force motrice. M. S. Carnot, dans l'ouvrage déjà cité, nous paraît avoir posé les véritables bases de cette partie importante de la mécanique pratique.

2.6 - Naissance de la thermodynamique : Lord Kelvin et Rudolf Clausius [1,18,19]

C'est bien grâce au Mémoire de Clapeyron que les idées des travaux de Sadi Carnot ont émergé chez les physiciens, en particulier avec William Thomson, alias Lord Kelvin. Thomson, né en 1824 à Belfast, dans une famille écossaise qui rentra ensuite à Glasgow, montra très jeune un intérêt pour les mathématiques et leurs applications aux sciences naturelles. Entre 16 et 17 ans il écrivit, sous pseudonyme, deux articles défendant la théorie de la propagation de la chaleur de Joseph Fourier, à l'époque très critiquée chez les Britanniques. William Thomson montrait ainsi une ouverture

précoce vers la façon de « faire » science chez les continentaux et notamment en France. De plus, il inaugurerait sa production scientifique en étudiant un phénomène, celui de la conduction de la chaleur, où l'irréversibilité joue un rôle clé. Il entra à l'université de Cambridge en 1841 et obtint son diplôme B.A.⁵⁷ en 1845. Juste après, il passa quelques mois à Paris dans le laboratoire de Henri Regnault, connu pour ses études sur les propriétés thermiques des gaz. En 1846 il fut nommé à la chair de philosophie naturelle (aujourd'hui on dirait, physique) de l'Université de Glasgow, charge qu'il maintiendra jusqu'à la fin de sa vie malgré avoir été, à plusieurs reprises, invité à rejoindre l'université de Cambridge.

Le problème de définir une échelle de température absolue indépendante des outils spécifiques (les thermomètres et leurs substances) utilisés pour la mesurer hantait la communauté scientifique de l'époque et, depuis le séjour chez Henri Regnault, était l'un des sujets qui occupaient Thomson. Dans le numéro du 5 juin 1848 des *Cambridge Philosophical Society Proceedings*⁵⁸ le futur Lord Kelvin introduit l'échelle de température absolue qui portera ensuite son nom. La dette envers Carnot s'explique depuis le titre, « *On the Absolute Thermometric Scale Founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and Calculated from Regnault's Observations* ». Dans une note en bas de page William Thomson explique que, n'ayant pas pu se procurer une copie des *Réflexions* il dut se contenter d'une traduction de l'article d'Émile Clapeyron, dont par ailleurs la partie expérimentale lui semble douteuse. Dans une note ajoutée à la réédition du même article en 1881, Thomson dit n'avoir pu mettre la main sur une copie des *Réflexions* que quelques mois après la communication de juin 1848. Il en fera un bon usage pour écrire le deuxième article qu'il dédie à Sadi Carnot, publié sur les *Transactions of the Edinburgh Royal Society* en 1849⁵⁹.

Dans la première communication, William Thomson montre que la définition du cycle thermodynamique réversible, telle qu'elle se trouve dans le mémoire de Carnot, est bien l'outil conceptuel qui manquait pour définir de façon rigoureuse une échelle de température absolue. Il écrit :

À première vue, le principe à suivre pour définir une échelle thermométrique absolue pourrait paraître évident, car il semblerait qu'un thermomètre parfait devrait mesurer des quantités de chaleur égales en correspondance d'égales changements de température estimées depuis les marques sur son échelle. Cependant, il est aujourd'hui reconnu (depuis les variations des chaleurs spécifiques des corps) comme un fait démontré par voie expérimentale, qu'une thermométrie ne serait pas possible sous ces conditions, ce qui nous laisse sans aucun principe sur lequel fonder une échelle de température absolue.⁶⁰

Thomson se réjouit de la précision et de la fiabilité de la dernière génération de thermomètres à gaz, notamment de ceux basés sur les études des propriétés thermiques des gaz publiés par

⁵⁷ Bachelor of arts, diplôme universitaire de premier cycle.

⁵⁸ Republié ensuite sur le *Philosophical Magazine* W. Thomson, on the Absolute Thermometric Scale Founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and Calculated from Regnault's Observations, *Philos Mag* 33, 313 (1848).

⁵⁹ W. Thomson, *An Account of Carnot's Theory of the Motive Power of Heat; with Numerical Results Deduced from Regnault's Experiments on Steam.*, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 16, 541 (1849).

⁶⁰ Trad. des auteurs : « The principle to be followed in constructing a thermometric scale might at first sight seem to be obvious, as it might appear that a perfect thermometer would indicate equal additions of heat, as corresponding to equal elevations of temperature, estimated by the numbered divisions of its scale.

It is however now recognized (from the variations in the specific heats of bodies) as an experimentally demonstrated fact that thermometry under this condition is impossible, and we are left without any principle on which to found an absolute thermometric scale. », W. Thomson, *on the Absolute Thermometric Scale*, op. Cit.

Regnault, et de leur utilité pratique. Pourtant, il conclut, ces thermomètres ne pourront pas servir à définir une échelle thermique absolue. En effet, leur précision,

augmente grandement l'utilité pratique des thermomètres à air ; tout de même on ne peut que définir un standard rigoureux qu'en utilisant en qualité de substance thermométrique un certain gaz à une pression déterminée. De cette manière, bien qu'ayant un principe défini de façon rigoureuse pour construire un système pour estimer la température, notre standard sera tout de même associé à une substance thermométrique *spécifique*, on ne pourra pas considérer d'être arrivés à définir une échelle *absolue* et on ne pourra que regarder l'échelle ainsi adoptée que comme *une séquence arbitraire de points de référence numérotés répondant aux exigences de la thermométrie pratique*.

Donc, à l'état actuel des sciences physiques, une question du plus grand intérêt se pose : *existe-t-il un principe sur lequel fonder une échelle de température absolue ?* Il me paraît que la théorie de Carnot à propos de la puissance motrice de la chaleur nous autorise à donner une réponse positive.

La relation entre puissance motrice et chaleur, telle qu'elle l'a établie Carnot, est telle que *quantité de chaleur et intervalles de température* sont les seules grandeurs impliquées dans l'expression déterminant la quantité d'effet mécanique obtenue par l'action de la chaleur ; puisqu'on possède indépendamment, un système pour mesurer la chaleur, on a ainsi l'opportunité de mesurer des intervalles à partir desquelles construire une échelle absolue de température⁶¹.

C'est avec ce passage que Sadi Carnot entre par la porte principale dans l'histoire de la Thermodynamique ainsi que de la physique. Il faut souligner que, dans cette communication de 1848, William Thomson prend carrément parti pour l'ancien paradigme, qu'il considère universellement accepté, qui voit le fluide calorique comme une entité matérielle conservée. Il est néanmoins au courant de l'expérience menée par James Joule à Manchester, qu'il mentionne dans une note de bas de page. Avec la subtilité qui le caractérise, Thomson est bien conscient que les résultats de Joule pourraient fragiliser la relation « universellement » acceptée entre chaleur et travail ce qui ne pourrait que provoquer un renversement radical de paradigme. Il conclut la note avec ces mots :

mais il faut tout de même avouer qu'il y a encore pas mal de mystères autour de ces questions fondamentales de la philosophie de la nature⁶².

⁶¹ Trad. des auteurs, « enhances very much the practical value of the air-thermometer; but still a rigorous standard can only be defined by fixing upon a certain gas at a determinate pressure, as the thermometric substance. Although we have thus a strict principle for constructing a definite system for the estimation of temperature, yet as reference is essentially made to a *specific* body as the standard thermometric substance, we cannot consider that we have arrived at an *absolute* scale, and we can only regard, in strictness, the scale actually adopted as an *arbitrary series of numbered points of reference sufficiently close for the requirements of practical thermometry*.

In the present state of physical science, therefore, a question of extreme interest arises: *Is there any principle on which an absolute thermometric scale can be founded?* It appears to me that Carnot's theory of the motive power of heat enables us to give an affirmative answer.

The relation between motive power and heat, as established by Carnot, is such that *quantities of heat*, and *intervals of temperature*, are involved as the sole elements in the expression for the amount of mechanical effect to be obtained through the agency of heat; and since we have, independently, a definite system for the measurement of quantities of heat, we are thus furnished with a measure for intervals according to which absolute differences of temperature may be estimated. », , *W. Thomson, on the Absolute Thermometric Scale, op. Cit.*

⁶² Trad. des auteurs, « but it must be confessed that as yet much is involved in mystery with reference to these fundamental questions of natural philosophy. », *W. Thomson, on the Absolute Thermometric Scale, op. Cit.*

L'année suivante, dans une communication lue le 2 janvier 1849⁶³ à la *Royal Society of Edinburgh*, Thomson peut finalement rendre compte de façon détaillée de la théorie de Carnot en ayant lu l'originale des *Réflexions*. Dans cet article, l'auteur, bien qu'affirmant encore la validité de l'ancienne théorie de la chaleur comme « substance » calorifique qui ne peut être ni créée ni détruite, semble être de plus en plus dubitatif à ce propos. Il attribue ses doutes à Carnot lui-même. Juste avant de discuter les expériences de James Joule sur la génération de chaleur par frottement d'un fluide et par le passage d'un courant galvanique dans un conducteur, il cite une note qui apparaît dans les *Réflexions* où Sadi Carnot écrit :

Nous supposons implicitement, dans notre démonstration, que lorsqu'un corps a éprouvé des changements quelconques, et qu'après un certain nombre de transformations il est ramené identiquement à son état primitif, c'est-à-dire à cet état considéré relativement à la densité, à la température, au mode d'agrégation, nous supposerons, dis-je, que ce corps se trouve contenir la même quantité de chaleur qu'il contenait d'abord, ou autrement que les quantités de chaleur absorbées ou dégagées dans ses diverses transformations sont exactement compensées. Ce fait n'a jamais été mis en doute, il a été d'abord admis sans réflexion et vérifié ensuite dans beaucoup de cas par les expériences du calorimètre. Le nier, ce serait renverser toute la théorie de la chaleur à laquelle il sert de base. *Au reste, pour le dire en passant, les principaux fondements sur lesquels repose la théorie de la chaleur auraient besoin de l'examen le plus attentif. Plusieurs faits d'expérience paraissent à peu près inexplicables dans l'état actuel de cette théorie*⁶⁴.

William Thomson, de moins en moins convaincu par la théorie du fluide calorifique, a bien détecté la seule nuance, dans le mémoire de Sadi Carnot, à partir de laquelle on pourrait entrevoir les doutes de ce dernier. Aujourd'hui, grâce à la publication, en 1878, des notes posthumes, on sait qu'il s'agissait de bien plus que d'une nuance. La phrase finale, soulignée en italique, exprime la nécessité d'aller plus loin laissant entendre que Carnot ne croit plus à l'ancienne théorie de la chaleur. De son côté Thomson commente cette phrase en écrivant :

Depuis les temps où Carnot s'exprimait de cette manière, la nécessité d'un examen plus attentif de l'ensemble des bases expérimentales de la théorie de la chaleur est devenue de plus en plus urgente. Notamment, toutes les assumptions s'appuyant sur l'idée que la chaleur serait une substance, invariable dans sa quantité ; inconvertible dans d'autres éléments et incapable d'être générée par des autres grandeurs physiques⁶⁵;

Au mois de mai de l'année suivante apparaît sur *Annalen der Physik* un article signé par Rudolf Clausius⁶⁶ qui a pour titre « *Sur la force motrice de la chaleur et les lois qui s'en déduisent pour la théorie même de la chaleur* »⁶⁷. Son auteur prend parti pour une position radicale vis-à-vis de la théorie du calorifique. Il y cite la note de Sadi Carnot à laquelle se réfère William Thomson et cite

⁶³ W. Thomson, *An Account of Carnot's Theory of the Motive Power of Heat; *with Numerical Results Deduced from Regnault's Experiments on Steam.*, Transactions of the Royal Society of Edinburgh 16, 541 (1849).

⁶⁴ S. Carnot, *Réflexions*, p. 37, note, l'italique est des auteurs.

⁶⁵ Trad. des auteurs, «*Since the time when Carnot thus expressed himself, the necessity of a most careful examination of the entire experimental basis of the theory of heat has become more and more urgent. Especially all those assumptions depending on the idea that heat is a substance, invariable in quantity; not convertible into any other element, and incapable of being generated by any physical agency;* », W. Thomson, *An Account of Carnot's Theory*, §7.

⁶⁶ Rudolf Clausius (1822-1888), physicien prussien.

⁶⁷ R. Clausius, *Ueber Die Bewegende Kraft Der Wärme Und Die Gesetze, Welche Sich Daraus Für Die Wärmelehre Selbst Ableiten Lassen*, *Annalen Der Physik* 155, 368 (1850), traduit ensuite en anglais dans : R. Clausius, *On the Moving Force of Heat, and the Laws Regarding the Nature of Heat Itself Which Are Deducible Therefrom*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2, 1 (1851).

également ce dernier. Clausius s'attaque à une note en bas de page de l'article de 1849 où Thomson écrit que :

Il pourrait apparaître que la difficulté serait contournable en abandonnant l'axiome de Carnot ; un point de vue fortement plaidé par M. Joule [...] ; pourtant, en ce faisant, on rencontrerait des innombrables nouvelles difficultés insurmontables sans des ultérieures recherches expérimentales et sans une reformulation de la théorie de la chaleur depuis ses fondements⁶⁸.

Pour Rudolf Clausius le parti est pris, il écrit :

Je crois pourtant, qu'il ne faudrait pas se laisser intimider par ces difficultés ; mais que, au contraire, on devrait se pencher carrément vers cette théorie qui considère la chaleur comme une forme de mouvement [...]⁶⁹

et, un peu plus loin :

on ne trouve pas que la nouvelle théorie soit opposée au principe fondamental de Carnot, on ne trouve d'opposition qu'à l'ajout « il n'y a pas de chaleur perdue » car il est fort possible qu'au cours de la production de travail deux phénomènes coexistent : une certaine quantité de chaleur pourrait être consommée et une autre pourrait être transférée depuis un corps chaud à un corps froid : ces deux portions de chaleur ayant une relation définie avec la quantité de travail produite⁷⁰.

Finalement, le 17 mars 1851, la communication de William Thomson qui a pour titre « On the Dynamical Theory of Heat, with Numerical Results Deduced from Mr Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam » est lue à la Royal Society of Edinburg. Elle sera ensuite publiée en janvier 1853⁷¹ et régulièrement mise à jour par son auteur dans les réimpressions qui suivirent. Thomson, poussée par la lecture de Clausius passe lui aussi le pont et abandonne définitivement la théorie du fluide calorique. Avec une honnêteté et une modestie rare chez les grands savants de son envergure, il reconnaît toutes ses dettes intellectuelles. Il dit :

Ce que nous venons de dire n'a pas pour but de réclamer la priorité en notre faveur. Le mérite d'avoir, le premier, établi la proposition sur des principes exacts appartient tout entier à M. Clausius, qui en publia la démonstration, au mois de mai de l'année dernière, dans la deuxième partie de son travail [*] sur la puissance motrice de la chaleur. Qu'il nous soit permis d'ajouter que nous avons donné la démonstration ci-dessus, exactement comme

⁶⁸ Trad. des auteurs, «It might appear, that the difficulty would be entirely avoided, by abandoning Carnot's fundamental axiom; a view which is strongly urged by Mr Joule [...] If we do so, however, we meet with innumerable other difficulties--insuperable without farther experimental investigation, and an entire reconstruction of the theory of heat from its foundation », W. Thomson, *An Account of Carnot's Theory*, op. cit., §12, note en bas de page.

⁶⁹ Trad. des auteurs, « I believe, nevertheless, that we ought not to suffer ourselves to be daunted by these difficulties; but that, on the contrary, we must look steadfastly into this theory which calls heat a motion [...] », R. Clausius, *On the Moving Force of Heat*, op. cit.

⁷⁰ Trad. des auteurs, « we find that the new theory is opposed, not to the real fundamental principle of Carnot, but to the addition "no heat is lost;" for it is quite possible that in the production of work both may take place at the same time; a certain portion of heat may be consumed, and a further portion transmitted from a warm. body to a cold one; and both portions may stand in a certain definite relation to the quantity of work produced », R. Clausius, *On the Moving Force of Heat*, op. cit.

⁷¹ W. Thomson, *On the Dynamical Theory of Heat, with Numerical Results Deduced from Mr Joule's Equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam*, Transactions of the Royal Society of Edinburgh 20, 261 (1853), traduit et publié en français dans : W. Thomson, *Deux Mémoires Sur La Théorie Dynamique De La Chaleur*, Journal De Mathématiques Pures Et Appliquées 17, 209 (1852).

elle s'était présentée à notre esprit, avant de savoir que M. Clausius eût énoncé ou démontré ladite proposition.⁷²

Modestie de côté, cet article fonde, de quelque façon, la thermodynamique moderne. Il s'y trouve pour la première fois sa formulation déclinée en deux principes :

Première proposition (M. Joule). — Lorsque des quantités égales d'effet mécanique sont produites par des causes purement thermales, quel que soit d'ailleurs le mode d'opérer, des quantités égales de chaleur sont anéanties ; et réciproquement, il y a production de quantités égales de chaleur, toutes les fois que des quantités égales d'effet mécanique sont dépensées en effets purement thermaux.

Deuxième proposition (M. Carnot et M. Clausius). — Si une machine est disposée de telle sorte que, lorsqu'on la fait fonctionner en sens inverse, toutes les actions physiques et dynamiques, existant dans ses divers organes, se présentent exactement dans un état inverse, cette machine produit autant d'effet mécanique qu'il est possible d'en obtenir, avec une quantité donnée de chaleur, d'une machine thermodynamique fonctionnant dans les mêmes conditions de température du réfrigérant et de la source de chaleur⁷³

Dans le §12 de ce même article Thomson formule le postulat suivant :

Il est impossible, au moyen d'agents matériels inanimés, de tirer aucun effet mécanique d'une substance quelconque, en abaissant sa température au-dessous de la température des corps qui sont le plus froids, parmi tous ceux qui environnent cette substance⁷⁴.

Ce dernier, dans les cours de thermodynamique plus récents prend la forme suivante :

une transformation dont le seul résultat final est de transformer en travail, la chaleur extraite d'une source qui est à la même température tout au long du processus est impossible⁷⁵.

La formulation associée à Rudolf Clausius du deuxième principe que l'on trouve dans les textes contemporains est énoncée par William Thomson dans le §14 :

Il est impossible qu'une machine auto-motrice, sans l'aide d'aucun agent extérieur, fasse passer de la chaleur d'un corps dans un autre corps ayant une température plus élevée⁷⁶.

De son côté, Thomson, se confrontant avec l'irréversibilité depuis ses travaux sur la théorie de la chaleur de Fourier, publie un article réfléchissant sur les conséquences générales de la tendance naturelle vers la dégradation du travail en chaleur. Avec un titre emblématique « *On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy* »⁷⁷. L'idée d'irréversibilité était tout à fait étrangère aux lois de la mécanique classique, dont les équations sont invariantes vis-à-vis du changement de signe de la variable temps. De l'autre côté, l'idée d'un univers qui n'est pas éternel, seul Dieu l'étant, faisait partie du bagage philosophique de l'époque victorienne et, même le mot « dissipation », avec son assonance morale, réfléchit le côté religieux présent dans la pensée de William Thomson. Néanmoins, la modernité des conclusions de l'article est assez frappante :

⁷² W. Thomson, *Deux Mémoires*, op. cit.

⁷³ W. Thomson, *Deux Mémoires*, op. cit.

⁷⁴ W. Thomson, *Deux Mémoires*, op. cit.

⁷⁵ E. Fermi, *Thermodynamics*, Prentice-Hall Company (1937).

⁷⁶ W. Thomson, *Deux Mémoires*, op. cit.

⁷⁷ W. Thomson, *On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 4, 304 (1852).

1. Il existe aujourd'hui, dans le monde matériel, une tendance universelle vers la dissipation de l'énergie mécanique.
2. Toute *restauration* d'énergie mécanique qui ne soit pas accompagnée par une dissipation plus qu'équivalente, est impossible dans les processus matériels inanimés, et n'a probablement jamais lieu chez la matière organisée, qu'elle soit dotée de vie végétale ou qu'elle soit contrôlée par la volonté d'une créature vivante.
3. La terre a dû être, à une époque dans le passé, et sera, à une époque dans le futur, inhabitable pour les êtres humains, à moins que des opérations contraires aux lois qui règlent le monde matériel aujourd'hui aient été effectuées dans le passé, ou le soient dans le futur⁷⁸.

Les deux grandeurs qui manquent encore pour arriver à une formulation de la thermodynamique telle celle qu'on la trouve dans les textes actuels furent introduites par Rudolf Clausius : il s'agit de l'énergie interne, U , et de l'entropie S .

Dans un article publié en 1854⁷⁹ Clausius se préoccupe de traiter de façon quantitative la nature plus ou moins réversible d'un cycle thermodynamique. Pour ce faire il donne, d'abord, une nouvelle formulation du premier principe en définissant une grandeur qu'il appelle U (dans l'article il parle de « travail interne », aujourd'hui le concept d'énergie étant bien établi on le dénomme « énergie interne ») dont la variation sur une transformation cyclique sera nulle. Il s'agit d'une variable d'état conservée, dit en termes modernes, qui sur une transformation ouverte pourra changer par l'addition ou soustraction de chaleur Q , ou de travail W . Toute variation de cette fonction sera donc égale à la somme algébrique des échanges de chaleur et travail $\Delta U = Q + W$ avec $\Delta U = 0$ sur tout cycle fermé. Dans la deuxième partie de l'article, Rudolf Clausius montre que, au long d'une transformation cyclique réversible il y a une autre grandeur qui se conserve. Il s'agit de la somme de toutes les chaleurs échangées divisée par la température à laquelle l'échange a eu lieu. Pour un cycle de Carnot où, on l'a vu, il n'y a que de la chaleur échangée au long des deux isothermes, l'une à la température de la source froide T_1 , l'autre à celle de la source chaude T_2 , on aura :

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0,$$

ce qui revient, sur une transformation cyclique réversible composée de plusieurs échanges isothermes, à

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = 0.$$

Rudolf Clausius définit une transformation pour laquelle la relation ci-dessus est respectée une opération « compensée », ou réversible. Il en résulte la possibilité de quantifier le degré de non-

⁷⁸ Trad. des auteurs, « 1. There is at present in the material world a universal tendency to the dissipation of mechanical energy.

2. Any restoration of mechanical energy - without more than an equivalent of dissipation, is impossible in inanimate material processes, and is probably never affected by means of organized matter, either endowed with vegetable life or subjected to the will of an animated creature.

3. Within a finite period of time past the earth must have been, and within a finite period of time to come the earth must again be, unfit for the habitation of man as at present constituted, unless operations have been, or are to be performed, which are impossible under the laws to which the known operations going on at present in the material world are subject. », W. Thomson, *On a Universal Tendency in Nature*, op. cit.

⁷⁹ R. Clausius, *Über Eine Veränderte Form Des Zweiten Hauptsatzes Der Mechanischen Wärmetheorie*, *Annalen Der Physik* 169, 481 (1854), traduit en français l'année suivante, R. Clausius, *Mémoire Sur Une Forme Nouvelle Du Second Théorème Principal De La Théorie Mécanique De La Chaleur*, *Journal De Mathématiques Pures Et Appliquées* 20, 63 (1855).

réversibilité d'une transformation avec son degré de compensation, soit avec l'éventuelle valeur non nulle du terme $\sum_i \frac{Q_i}{T_i}$. Finalement, dans une communication lue par Clausius devant la *Société des Sciences naturelles* de Zurich, le 24 avril 1865⁸⁰ la nouvelle fonction est indiquée avec la lettre S telle que,

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T},$$

$$S \geq S_0 + \int \frac{\delta Q}{T}.$$

Clausius écrit :

Si l'on cherche un nom caractéristique pour la quantité S, on pourrait l'appeler le contenu de transformation du corps, exactement comme on a dit que U représente son contenu de chaleur et d'œuvre. Mais comme j'estime qu'il vaut mieux tirer des langues anciennes les noms de quantités aussi importantes dans la science, afin qu'on puisse les employer sans modification dans toutes les langues modernes, je propose le nom d'entropie, tiré du grec *ἡ τροπή*, la transformation. C'est avec intention que j'ai formé le mot entropie aussi semblable que possible au mot énergie vu que les grandeurs ainsi désignées ont une telle parenté, d'après leur signification physique, qu'une certaine analogie m'a paru convenable dans leur dénomination⁸¹.

On en déduit que le long d'une transformation thermodynamique cyclique, la formulation du deuxième principe de la thermodynamique donne :

$$0 \geq \oint \frac{\delta Q}{T}$$

où l'égalité n'est valable que dans le cas d'une transformation réversible. L'article de 1865 se conclut avec la formulation de Clausius du principe universel de dissipation formulé par Thomson en 1852⁸² :

Pour le moment, je me bornerai à indiquer un résultat que l'on peut exprimer comme suit : Si l'on suppose qu'en tenant compte de toutes les circonstances, on ait formé pour l'univers entier la grandeur que j'ai nommée entropie relativement à chaque corps particulier, et si l'on applique en même temps l'autre idée plus simple de l'énergie, on pourra exprimer comme suit les deux lois fondamentales de l'univers, qui correspondent aux deux théorèmes principaux de la théorie mécanique de la chaleur :

1. L'énergie de l'univers est constante.
2. L'entropie de l'univers tend vers un maximum⁸³.

⁸⁰ R. Clausius, *Ueber Verschiedene Für Die Anwendung Bequeme Formen Der Hauptgleichungen Der Mechanischen Wärmetheorie*, *Annalen Der Physik* 201, 353 (1865), traduite en français dans, R. Clausius, *Sur Diverses Formes Facilement Applicables Qu'on Peut Donner Aux Équations Fondamentales De La Théorie Mécanique De La Chaleur.*, *Journal De Mathématiques Pures Et Appliquées* 361 (1865).

⁸¹ R. Clausius, *Sur Diverses Formes*, op. cit.

⁸² W. Thomson, *On a Universal Tendency*, op. cit.

⁸³ R. Clausius, *Sur Diverses Formes*, op. cit.

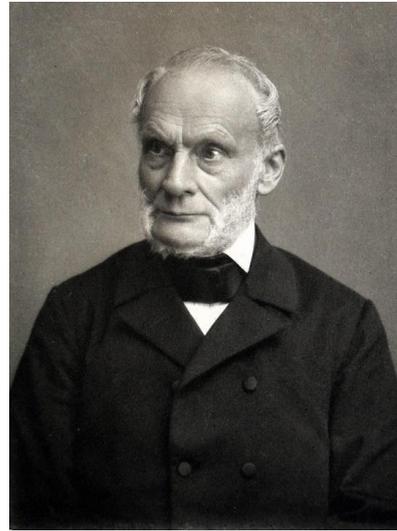
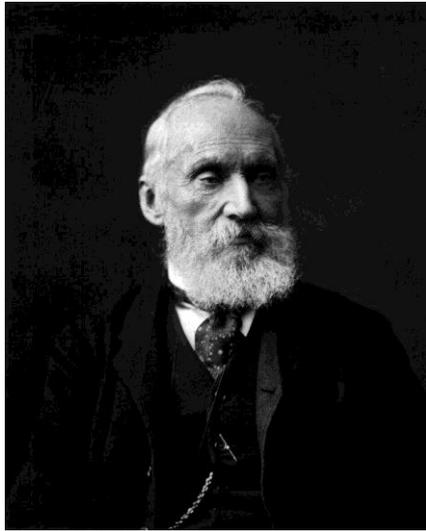


Figure 12 : Photographies de William Thomson et Rudolf Clausius âgés, source Wikicommons

2.7 - Quelques notions de thermodynamique

Les quelques notions de thermodynamique vues dans ce document sont rappelées ici brièvement.

Premier principe de la thermodynamique :

Également appelé principe de la conservation de l'énergie, il affirme que pour un système isolé, quelle que soit la transformation que le système subit, l'énergie se conserve, c'est-à-dire que l'énergie change de forme mais elle ne se crée pas et ne disparaît pas.

Pour un système qui n'échange pas de matière avec son environnement, soit un système fermé, la variation de son énergie interne au cours d'une transformation, ΔU , est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur par transfert thermique, Q , et par transfert de travail, W :
 $\Delta U = Q + W$.

ΔU est la variation de l'énergie interne U du système ; Q est la quantité de chaleur totale échangée par le système ; W est le travail total échangé par le système. La convention thermodynamique, compte positivement la chaleur/le travail reçus et négativement lorsqu'ils sont fournis. Ici il faut retenir que :

- l'énergie interne U caractérise de façon unique l'état du système ; alors une série de transformations qui ramène le système à son état de départ, soit une transformation cyclique, correspond à une variation d'énergie interne nulle, $\Delta U=0$;
- chaleur et travail sont des quantités définies uniquement pour une transformation qui peut amener le système à changer d'état. Q et W représentent l'énergie reçue/fournie par le système lors de cette transformation, lesquelles n'ont aucune relation avec l'état du système. À un système fermé et isolé, on peut associer une énergie interne U tandis qu'on ne pourrait d'aucune manière lui associer une certaine quantité de travail ou de chaleur Q et W .

Deuxième principe de la thermodynamique :

Comme on l'a vu, les premières énonciations du deuxième principe de la thermodynamique se trouvent dans les articles de Lord Kelvin et de Rudolf Clausius du milieu du XIX^e siècle. On reproduit

ici les deux formulations, légèrement modifiées, telles qu'elles ont été adoptées par la plupart des textes de thermodynamique du XX^e siècle⁸⁴ :

- une transformation cyclique dont le seul résultat final est de transformer en travail la chaleur extraite d'une source qui est à la même température tout au long du processus est impossible (postulat de Lord Kelvin).

Ensuite :

- une transformation cyclique dont le seul résultat final serait de transférer de la chaleur depuis un corps à une température donnée à un autre se trouvant à une température supérieure est impossible (postulat de Clausius).

Un premier fait marquant qui émerge de la lecture des deux postulats est qu'ils définissent des impossibilités : le deuxième principe de la thermodynamique est une loi qui pose une limite. Le postulat de Lord Kelvin peut se reformuler en disant qu'il n'existe pas de machine qui peut transformer de la chaleur en travail en opérant avec une seule source thermique. Deux réservoirs, un chaud, l'autre froid seront toujours nécessaires. Une machine cyclique pourra temporairement augmenter son énergie interne en recevant la chaleur Q_1 depuis une chaudière mais ne pourra pas revenir à son état initial en cédant à l'environnement l'énergie acquise depuis la source chaude sous forme de travail W uniquement. Pour revenir à son état initial la machine devra céder de l'énergie sous la forme de chaleur envers une source froide, Q_2 et éventuellement du travail W . Puisque, suivant le premier principe, sur un cycle $\Delta U = Q_1 - Q_2 - W = 0$ on aura $Q_1 - Q_2 = W$. Vu de cette façon le deuxième principe établit une limite à la possibilité de transformer de la chaleur en travail. Si l'on définit le rendement de la machine η comme le rapport entre le travail produit W et la chaleur reçue depuis la source chaude Q_1 , il en résulte les expressions suivantes :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Pour une machine produisant du travail, soit avec $W > 0$, on aura $Q_2 < Q_1$. Cela comporte $\eta < 1$. On voit à quel point la formulation de Lord Kelvin est proche du théorème de Carnot, tel qu'il fut énoncé dans les *Réflexions*. De façon implicite, une loi posant une limite à la capacité de convertir de la chaleur en travail définit aussi une direction privilégiée vis à vis de l'écoulement du temps. On est en train de dire qu'à chaque fois qu'on transforme du travail en chaleur, par exemple en utilisant l'effet Joule dans la résistance d'un radiateur électrique, une partie du travail utilisé, électrique dans ce cas, sera perdue pour toujours. C'est là que Lord Kelvin utilise le mot « dissipation » pour décrire intrinsèquement l'irréversibilité des processus thermiques⁸⁵.

Le postulat de Rudolf Clausius, de son côté, en établissant l'impossibilité d'un flux spontané de chaleur depuis un corps froid vers un corps chaud pointe du doigt la nature irréversible des processus thermiques et, par conséquent, l'existence d'une direction privilégiée de l'écoulement du temps. Arthur Eddington⁸⁶ dira, dans ses *Gifford lectures* (Édimbourg, 1926-1927)⁸⁷ : « J'utiliserai la phrase *flèche du temps* pour exprimer cette propriété d'unidirectionnalité du temps qui n'a pas d'analogie avec la symétrie de l'espace ».

⁸⁴ On utilise ici la réédition du cours de thermodynamique de Enrico Fermi : Fermi, *Thermodynamics*, (Dover, 1956).

⁸⁵ W. Thomson, *On a Universal Tendency*, op. cit.

⁸⁶ Arthur Eddington (1882-1944), astrophysicien britannique.

⁸⁷ « I shall use the phrase "time's arrow" to express this one-way property of time which has no analogue in space. », A. S. Eddington, *The Nature of Physical World* (New York, McMillan, 1928).

L'introduction de la notion d'entropie⁸⁸, dont on a rendu compte plus haut, permet de formuler le deuxième principe de la thermodynamique sous la forme d'une égalité. Pour une transformation infinitésimale irréversible ou réversible, il existe une fonction d'état, notée S et appelée d'entropie est, telle que :

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_c$$

$\frac{\delta Q}{T}$ est l'entropie échangée par le système avec δQ la chaleur reçue algébriquement par le système et T la température de la source de chaleur. δS_c est l'entropie créée au cours de la transformation qui est strictement positive pour une transformation irréversible et nulle pour une transformation réversible. Pour un processus cyclique, l'intégration de la relation précédente sur un cycle, montre que pour un processus réversible, $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$. Dans le cas d'un processus irréversible, l'excédent de production d'entropie doit être expulsé pour retourner à l'état initial, ce qui conduit à un échange supplémentaire de chaleur qui se traduit par la relation $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$.

On peut reformuler le principe en disant que à l'échelle de l'univers, soit ici le système et ses réservoirs de chaleur, toute transformation doit correspondre à une augmentation, ou à une variation nulle de l'entropie de l'univers S_U ,

$$\Delta S_U \geq 0$$

La « flèche du temps » s'associe ainsi avec l'inéluctable augmentation de l'entropie de l'univers. L'explication de l'origine de l'irréversibilité du temps et notamment, du mécanisme permettant à des lois physiques fondamentales décrites par des équations réversibles (qu'il s'agisse des lois de Newton ou de l'équation de Schrödinger) de donner lieu à des comportements irréversibles sera au centre de discussions entre physiciens et philosophes qui durent jusqu'à aujourd'hui⁸⁹.

Il faudra attendre les travaux de Ludwig Boltzmann⁹⁰ avec une interprétation statistique s'appuyant sur la théorie cinétique des gaz, pour expliquer le rapport entre l'entropie de Clausius, grandeur associée au comportement de systèmes macroscopiques composés par une quantité de molécules de l'ordre du nombre d'Avogadro ($N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), et les lois microscopiques décrivant le comportement de molécules et atomes individuellement.

En cinq minutes, la vidéo *Le deuxième principe de la thermodynamique*, sixième volet des *Principes Clefs de la physique* du CES, permet de comprendre l'importance des travaux de Sadi Carnot, mais aussi ceux d'Émile Clapeyron, William Thomson, Rudolf Clausius ou encore ceux de James Maxwell⁹¹, Ludwig Boltzmann et Herbert Callen⁹² : <https://www.youtube.com/watch?v=9FPQHCFbvBk>.

Rendement maximal des machines ou théorème de Carnot ;

Le rendement d'un moteur échangeant avec deux sources de chaleur est maximal lorsque celui-ci fonctionne de façon réversible ; dans ce cas il ne dépend que des températures des deux sources.

⁸⁸ R. Clausius, *Sur Diverses Formes*, op. cit.

⁸⁹ Voir à ce propos l'excellent : Carlo Rovelli, *L'ordre du temps*. Trad. de l'italien par Sophie Lem. Flammarion 2018.

⁹⁰ Ludwig Boltzmann (1844, 1906), physicien et philosophe autrichien.

⁹¹ James Clerk Maxwell (1831-1879), physicien et mathématicien écossais.

⁹² Herbert Bernard Callen (1919-1993), physicien américain.

Comme on l'a vu plus haut, le rendement η d'un moteur ditherme peut se déduire en utilisant le premier et le deuxième principe conjointement :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Sadi Carnot, dans ses *Réflexions*, construit une machine réversible, avec un cycle composé de 4 transformations :

- 1) De 1 à 2 : Détente isotherme en contact avec la source chaude à la température T_1 ;
- 2) De 2 à 3 : Détente adiabatique réversible, la température du fluide diminue de T_1 à T_2 sans échanger de chaleur avec l'extérieur ;
- 3) De 3 à 4 : Compression isotherme en contact avec la source froide à la température T_2 ;
- 4) De 4 à 1 : Compression adiabatique réversible, la température augmente de T_2 à T_1 sans échanger de chaleur avec l'extérieur.

Dans un cycle ainsi construit il n'y a de chaleur échangée qu'au long des transformations isothermes. La réversibilité du cycle nous dit qu'on est en condition isentropique, soit qu'au total $\Delta S=0$. Seulement deux échanges réversibles d'entropie ont lieu au cours du cycle de Carnot : la détente isotherme où $S_1 = Q_1/T_1$ et la compression isotherme où $S_2 = -Q_2/T_2$. La réversibilité du cycle implique :

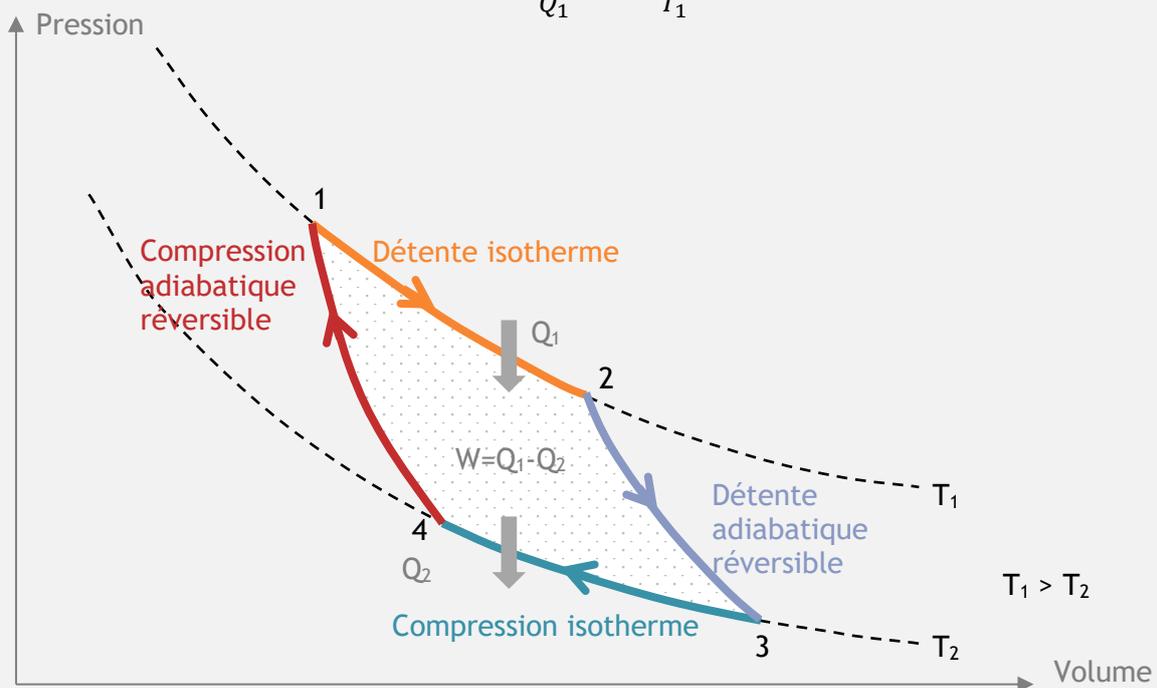
$$\Delta S = S_1 + S_2 = Q_1/T_1 - Q_2/T_2 = 0,$$

donc :

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2},$$

ce qui substitué dans l'expression du rendement nous ramène au résultat obtenu par Sadi Carnot :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$



3 – La famille Carnot [20]

La famille Carnot est une très ancienne famille française bourgeoise originaire de Bourgogne. Sous l'ancien régime (avant la Révolution), les professions sont marchand ou notaire. Claude Abraham Carnot (1719-1797), père de Lazare, grand-père paternel de Sadi et Hippolyte est notaire royal, bailli et juge à Nolay en Côte-d'Or. Il aura de nombreux enfants dont seuls huit arrivent à l'âge adulte (figure 13), trois d'entre eux ont un rôle au moment de la révolution française :

- Joseph (1752-1835), avocat au Parlement de Dijon, accusateur public pendant la Terreur, puis procureur général ;
- Lazare (1753-1823), père de Sadi, ingénieur, membre du Comité de Salut public (1793-1794), président en 1794 de la Convention nationale, puis Directeur (1795) (section 1.1) ;
- Claude dit « Carnot-Feulins » (1755-1836), député à l'Assemblée législative de 1791, représentant à la chambre des Cent-Jours en 1815, ministre de l'Intérieur par intérim (1815), lieutenant général du Génie (1817).

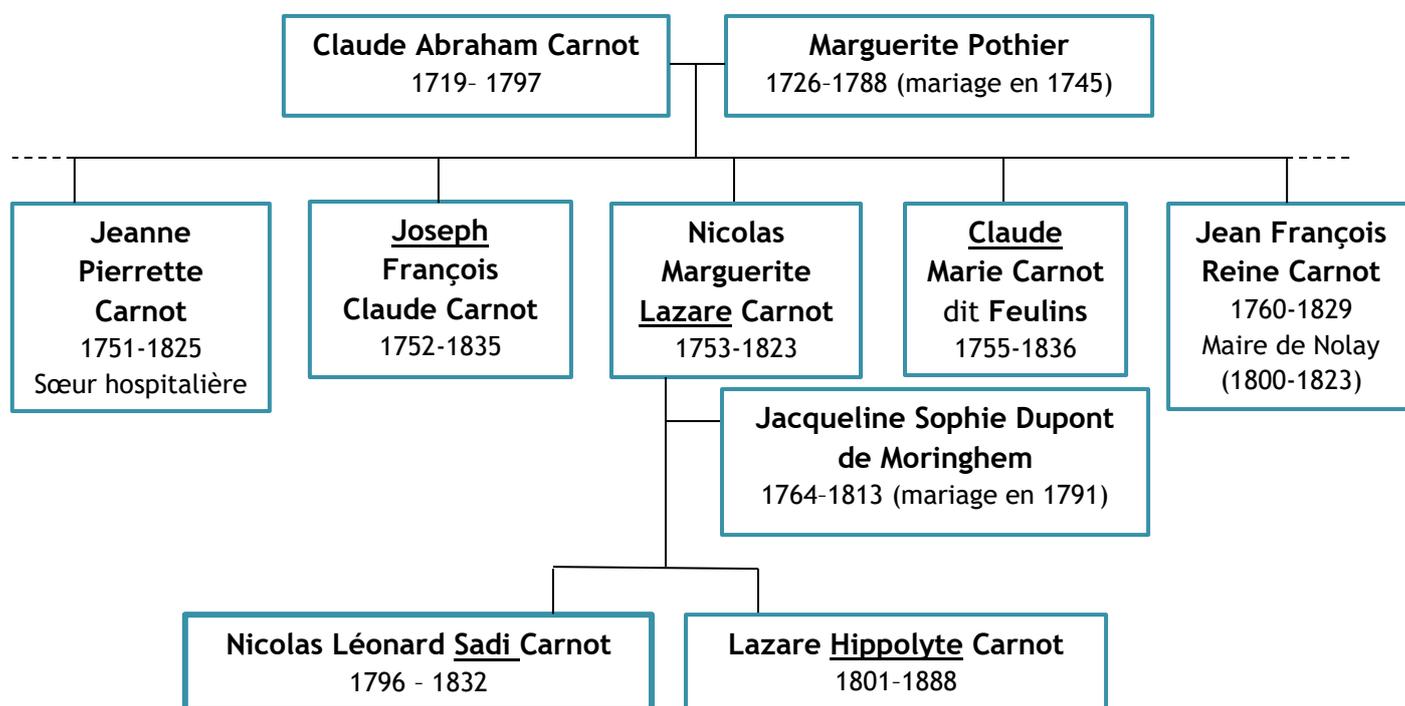


Figure 13 : Arbre généalogique partiel de Sadi Carnot depuis ses grands-parents paternels

Sadi Carnot étant sans descendance, nous nous intéressons maintenant à son frère Hippolyte et aux enfants de celui-ci.

3.1 - Hippolyte Carnot (1801-1888) [13,21]

Hippolyte Carnot, frère cadet de Sadi Carnot est né en 1801. À partir de 1807, Lazare Carnot se charge de l'éducation de ses deux fils ; ainsi Hippolyte comme Sadi bénéficie d'une solide formation en mathématiques, physique et mécanique. En 1815, Hippolyte suit dans l'exil son père Lazare, sa mère Sophie est déjà décédée. Après être passés en Belgique et en Pologne, Hippolyte et son père s'installent en Allemagne jusqu'à la mort de Lazare en 1823. Hippolyte rejoint alors Sadi à Paris. Il renonce à devenir avocat pour ne pas prêter serment à la monarchie restaurée.

Hippolyte Carnot est rentier comme son frère Sadi grâce à l'héritage de son grand-père maternel mais aussi de la fortune de son épouse Claire Dupont (1816-1897). Mariés en 1836, ils auront deux fils Marie-François Sadi (1837-1894), qui sera président de la république en 1887, et Marie Adolphe (1839-1920) chimiste, géologue et également homme politique.

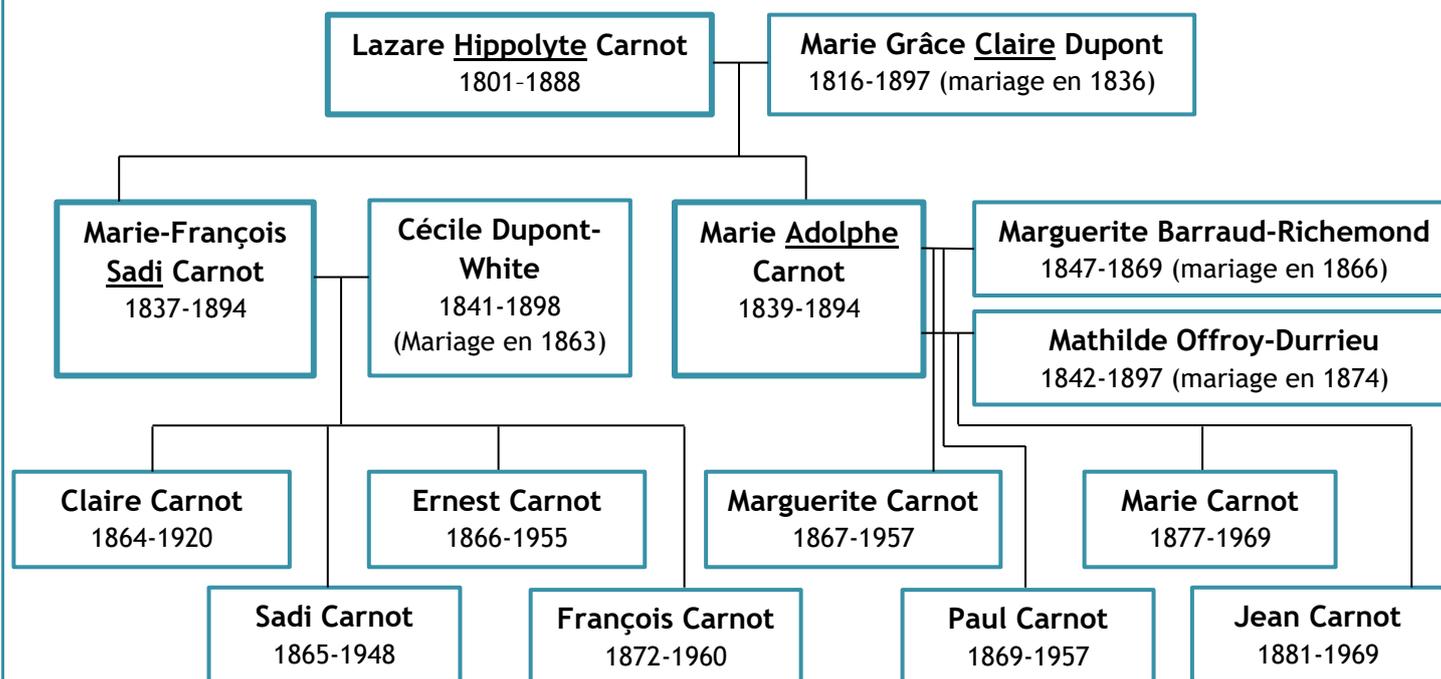


Figure 14 : Arbre généalogique d'Hippolyte Carnot

En décembre 1834, Hippolyte Carnot fait partie des fondateurs de la Société française pour l'abolition de l'esclavage. Élu député du 6^e arrondissement de Paris sous l'étiquette radicale aux élections législatives de 1839, Hippolyte Carnot est alors âgé de 38 ans ; il sera réélu en 1842 et 1846. En février 1848, acceptant la proclamation de la deuxième République, Hippolyte Carnot, 47 ans, devient Ministre de l'Instruction publique dans le gouvernement provisoire. Au ministère il fonda l'éphémère École d'administration⁹³ et, héritier des idées de son père Lazare, il établit un projet d'éducation gratuite et obligatoire, introduit de nouvelles méthodes éducatives comme des cours du soir, de petites bibliothèques, et revalorise les salaires des professeurs des écoles, auxquels il demandait *d'enseigner aux enfants les vertus de la République démocratique*.

En avril 1848, il est élu représentant du peuple de la Seine à l'Assemblée constituante. Après avoir décrété la gratuité à l'École normale supérieure⁹⁴, Hippolyte Carnot propose l'enseignement secondaire pour les filles. Du projet de loi d'Hippolyte Carnot soumis à l'Assemblée en juin 1848, plusieurs propositions furent reprises par la suite lors des lois Falloux⁹⁵ (1850) et surtout Ferry⁹⁶ (1880), dont, l'instruction primaire obligatoire et gratuite pour les filles et les garçons, ainsi que trois années de formation gratuites dans une école normale pour les futurs professeurs qui, en contrepartie, devaient enseigner pendant dix ans avec un salaire minimum garanti (plus important pour les hommes que pour les femmes... !).

⁹³ Ancêtre de l'ENA, École Nationale d'Administration, qui sera fondée à la sortie de la seconde guerre mondiale en 1948 et dissoute en 2021.

⁹⁴ ENS créée en 1794 par la Convention nationale.

⁹⁵ Alfred de Falloux (1811-1886), journaliste, historien et homme politique français, ministre de l'Instruction publique et des cultes (1848-1849).

⁹⁶ Jules Ferry (1832-1893), homme d'état français, ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts (1881-1883), mais aussi ministre des affaires étrangères, président du Sénat, etc.



Figure 15 : Hippolyte Carnot en 1848, portrait d'Achille Devéria⁹⁷, source [22]

Défait aux législatives de 1849, Hippolyte Carnot retrouve son siège dans une élection partielle en 1850, il fait partie des députés qui s'opposent au coup d'État de Louis-Napoléon Bonaparte⁹⁸, le 2 décembre 1851. Réélu aux élections législatives de 1852 dans la 4^e circonscription de Paris, il refuse de prêter serment de fidélité à Louis-Napoléon et ne siège pas, comme lors de sa réélection aux législatives de 1857 dans la 5^e circonscription de la capitale. Ce n'est qu'en 1864, lors d'une élection partielle dans la 1^{re} circonscription de Paris qu'Hippolyte Carnot accepte de prêter le serment préalable et se fait élire. Lors des élections législatives de 1869, il sera battu par Léon Gambetta⁹⁹.

Hippolyte Carnot est maire du 8^e arrondissement de Paris en septembre 1870, il est âgé de 69 ans et la troisième république est instaurée. Il est à nouveau élu député, de Seine-et-Oise, aux législatives de 1871. En 1875, il devient sénateur inamovible¹⁰⁰, et en 1881, il est élu membre de l'Académie des sciences morales et politiques¹⁰¹.

Hippolyte Carnot meurt en mars 1888 son fils Sadi est alors président de la troisième république depuis décembre 1887 (section suivante).

3.2 - Sadi Carnot (1837-1894) [23,24]

Marie François Sadi Carnot est le fils aîné d'Hippolyte Carnot et de Claire Dupont. Au moment de sa naissance en août 1837, son père est rentier mais sera très rapidement élu député (voir section précédente). Son troisième prénom, qui est également son prénom d'usage, lui vient de son oncle. Pour se distinguer de ce dernier, Sadi Carnot signe de ses trois initiales : M. F. S. Carnot. Son frère Adolphe Carnot naît en 1839 (section 3.3).

⁹⁷ Achille Devéria (1800-1857), peintre, illustrateur et graveur français.

⁹⁸ Louis-Napoléon Bonaparte, neveu de Napoléon 1^{er}, unique président de la deuxième république, dissout l'Assemblée nationale en 1851, rétablit le suffrage universel masculin et soumet un plébiscite de ses actions ; en 1852, le second empire est décrété, et Napoléon III devient empereur des français.

⁹⁹ Léon Gambetta (1835-1882), homme d'état français, qui proclama le retour de la république en 1870.

¹⁰⁰ Créés par les lois constitutionnelles de 1875, et abrogés en 1884, 75 sénateurs de la 3^{ème} république française sur 300 étaient élus jusqu'à leur décès, alors remplacés par un membre désigné par le Sénat.

¹⁰¹ Fondée en 1795, une des cinq académies de l'Institut de France.

L'image du grand-père paternel imprègne les deux garçons élevés dans un milieu républicain et patriote. Sadi et Adolphe Carnot sont en partie éduqués par leur père Hippolyte jusqu'à leurs scolarisations à partir de la sixième. Sadi Carnot entre alors au très renommé lycée impérial Bonaparte (futur lycée Condorcet) à Paris, et suit la filière littéraire, alors la plus prisée. Sadi Carnot, plusieurs fois récompensé au concours général¹⁰², obtient un baccalauréat lettres en 1854, puis en 1855, un baccalauréat sciences.

Sadi Carnot passe le concours d'entrée à l'École polytechnique en août 1857, il est reçu 5^e sur 120 admis (592 candidats étaient candidats). Au printemps 1858, Sadi Carnot, sérieusement malade, ne peut pas passer les examens de fin d'année. En septembre 1858, sur proposition du jury de classement, Sadi Carnot est autorisé par le ministère de la Guerre à doubler sa première année ; il y retrouve son frère Adolphe (section 3.3). En 1860, Sadi Carnot sort dans les premiers de l'École polytechnique, cependant ses notes en mécanique et physique ne lui permettent pas un classement suffisant pour le corps des mines¹⁰³, contrairement à son frère. Sadi Carnot intègre l'École nationale des ponts et chaussées¹⁰⁴, incontournable au milieu du XX^e siècle où les équipements de la France explosent. Entré aux Ponts et Chaussées major de promotion, Sadi Carnot le reste durant sa formation et sort également major ; sur les 23 concours organisés durant ses trois années d'études, il est primé à 22 reprises.

En 1863, Sadi Carnot épouse Cécile Dupont-White (1841-1898), fille de Charles Brook Dupont-White, avocat et économiste d'origine britannique et ami d'Hippolyte Carnot. Le couple aura quatre enfants : Claire (1864-1920), Sadi (1865-1948) qui sera colonel d'infanterie et écrivain, Ernest (1866-1955) qui sera ingénieur des mines, député de la Côte-d'Or en 1894 et François (1872-1960) qui sera ingénieur de l'Ecole centrale, député de la Côte-d'Or à la suite de son frère de 1902 à 1910, puis député de Seine-et-Oise de 1910 à 1914.

La carrière d'ingénieur de Sadi Carnot commence en Haute-Savoie, territoire annexé à la France quatre ans plus tôt et dont les infrastructures sont peu développées. Comme ingénieur des ponts et chaussées, il intervient lors de la construction et de l'entretien des réseaux routier. En particulier en 1868, Sadi Carnot mène les études du chemin de fer Annecy-Annemasse. Sadi Carnot est également le concepteur du pont de Collonges (figure 16), permettant aux communes de Haute-Savoie et du pays de Gex riveraines du Rhône de franchir ce fleuve entre les départements de l'Ain et de la Haute-Savoie (la Savoie est rattachée à la France depuis 1860). Les travaux de ce pont, dénommé « pont Carnot » après l'accession de Sadi Carnot à la présidence de la République française, ont commencé en 1865 et se sont terminés en 1874, après une interruption lors de guerre franco-prussienne de 1870. Ouvert à la circulation en 1875, l'ouvrage est primé à l'Exposition universelle de 1878 pour sa conception innovante.

Vers 1874, Sadi Carnot conçoit et fait construire le système de régulation de la sortie des eaux du lac d'Annecy : joyaux technique et architecturale pour l'époque, ces installations, appelées *vannes du Thiou*, permettent de remonter le niveau du lac (2 759 hectares) de 20 cm afin d'assurer aux usines un débit constant toute l'année ; à eux seuls, ces 20 cm permettent d'assurer seize jours de débit à l'étiage (4 m³/s). En cas de danger de crue, elles permettent de sortir un débit maximum de 45 m³/s.

¹⁰² Concours récompensant les meilleurs élèves des classes de première et terminale, créé en 1747.

¹⁰³ Créé en 1794, regroupe les ingénieurs des mines de la fonction publique française, recrutés dans les premiers du classement de sortie de l'École polytechnique.

¹⁰⁴ Créée en 1747, depuis 1794, école d'application de l'École polytechnique, les ingénieurs sont recrutés sur la base de leur classement de sortie.

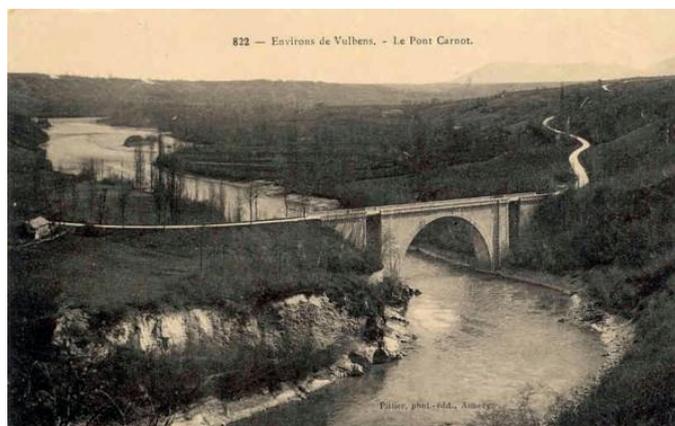


Figure 16 : Pont Carnot vers 1910 reliant le département de l'Ain (à droite) au département de la Haute-Savoie (à gauche), source wikicommons

Comme pour les autres membres de la famille, la fibre politique est présente chez Sadi Carnot dès ses années à l'École polytechnique, où il anime un cercle de militants républicains. En 1860, il est détenu pendant deux jours en salle de police en raison de ses activités de soutien au républicain italien Garibaldi¹⁰⁵. En 1871, Sadi Carnot est élu député républicain modéré de la Côte-d'Or, il est réélu aux législatives de 1876, 1877, 1881 et 1885. Carnot devient sous-secrétaire d'État aux Travaux publics en 1878 dans le gouvernement de Charles de Freycinet¹⁰⁶, alors président du conseil (premier ministre) puis ministre des Travaux publics en 1880 dans le cabinet de Jules Ferry, et ministre des Finances en 1885 dans le cabinet d'Henri Brisson¹⁰⁷ et en 1886 dans le cabinet de Charles Freycinet.

En décembre 1887, le scandale de *L'affaire des décorations* contraint le président de la république française Jules Grévy¹⁰⁸ à la démission. Selon les Lois constitutionnelles de 1875, le président de la république française est élu à la majorité absolue des suffrages par les deux chambres des députés et du Sénat réunies à Versailles en *Assemblée nationale*. Sadi Carnot arrive en tête du premier tour devant l'ancien président du Conseil Jules Ferry. Après le retrait de ce dernier, Sadi Carnot remporte le second tour face au général Saussier¹⁰⁹ candidat des conservateurs.



Figure 17 : Portrait officiel du président Sadi Carnot, source wikicommons

¹⁰⁵ Guisepe Garibaldi (1807-1882), général et homme politique italien, considéré comme un des pères de l'Italie unifiée.

¹⁰⁶ Charles de Freycinet (1828-1923), homme d'état et ingénieur français.

¹⁰⁷ Henri Brisson (1835-1912), avocat, journaliste et homme d'état français, président du conseil en 1885 puis 1898.

¹⁰⁸ Jules Grévy (1807-1891), président de la République française de janvier 1879 à décembre 1887.

¹⁰⁹ Félix Gustave Saussier (1828-1905), général français, gouverneur militaire de Paris de 1884 à 1897.

Le début du mandat de Sadi Carnot est marqué par l'agitation boulangiste¹¹⁰ et le scandale de *l'affaire de Panama*. Comme lors de la présidence de Jules Grévy, l'instabilité ministérielle entraîne la nomination par Sadi Carnot de neuf présidents du Conseil (premiers ministres) en moins de sept ans.

1889 est le centenaire de la Révolution française. Le 5 mai, alors que Sadi Carnot se rend à Versailles en mémoire des états généraux de 1789, Jean-Nicolas Perrin, magasinier de la Marine, tire sur le président en protestation de sa mutation. Toujours en mai 1889, Sadi Carnot ouvre au public l'*Exposition universelle de Paris* et en particulier l'attraction principale du moment, le plus grand monument au monde de cette époque, la tour ensuite appelée *Tour Eiffel*. Sadi Carnot essuiera un autre attentat le 14 juillet 1890, perpétré par Martial Jacobs, inventeur qui protestait d'avoir été spolié de certaines de ses inventions.

Depuis plusieurs années la montée en puissance de l'anarchisme génère des attentats sur le territoire français comme en Europe (Allemagne, Russie, Italie). En 1893 et 1894, trois lois sont adoptées pour réprimer le mouvement anarchiste français, lois qui seront appelées *lois scélérates* (elles ont été définitivement abrogées en 1992, un siècle plus tard). Dans le même temps, le président Sadi Carnot refuse d'accorder la grâce à Ravachol¹¹¹ (juillet 1892), Auguste Vaillant¹¹² (février 1894) et Émile Henry¹¹³ (mai 1894).

Le septennat de Sadi Carnot arrive à son terme en décembre 1894, il ne devait pas se représenter. Cependant lors qu'un déplacement à Lyon, Sadi Carnot est victime d'un attentat, poignardé par l'anarchiste Geronimo Caserio¹¹⁴. Le 1^{er} juillet 1894, après des funérailles nationales à Notre-Dame, Sadi Carnot est inhumé au Panthéon où il rejoint son grand père Lazare Carnot dont il avait fait transférer les cendres en août 1889.

3.3 - Adolphe Carnot (1839-1920) [25,26]

Né en janvier 1839, un an et demi après son frère Sadi, futur président de la République française dont nous venons de parcourir la vie, Adolphe Carnot sera également élève de l'École polytechnique, promotion 1858. Sorti 5^e, il intègre alors le Corps des mines dont il sortira 4^e en 1864.

Adolphe Carnot a 25 ans et commence sa carrière comme ingénieur des mines à Limoges, chargé de la carte géologique de l'Indre et de la mise en place du chemin de fer. En 1866, Adolphe Carnot épouse Marguerite Barraud-Richemond (1847-1869) avec qui il aura deux enfants, Marguerite (1867-1957) et Paul (1869-1957) qui sera médecin, professeur de médecine thérapeutique à la Faculté de médecine de Paris membre de l'Académie de médecine, découvreur de l'hémopoïétine¹¹⁵ avec sa doctorante Clothilde-Camille Deflandre (1871-1946), 4^{ième} femme à recevoir un doctorat ès sciences en France en 1903.

¹¹⁰ Boulangisme : mouvement politique française (1885-1889) créé par le général George Boulanger (1837-1891) qui mit en péril la troisième république.

¹¹¹ François Claudius Koëningstein dit Ravachol (1859-1892), ouvrier militant anarchiste condamné et guillotiné pour assassinats et attentats.

¹¹² Auguste Vaillant (1861-1894), anarchiste condamné et guillotiné pour attentat dans l'hémicycle de la chambre des députés, une bombe lancée qui fera une cinquantaine de blessés.

¹¹³ Émile Henry (1872-1894), anarchiste condamné et guillotiné pour attentats.

¹¹⁴ Sante Geronimo Caserio (1873-1894), ouvrier boulanger italien, anarchiste condamné à l'exil d'Italie puis à la guillotine en France après l'assassinat de Sadi Carnot.

¹¹⁵ L'hémopoïétine, ou l'érythropoïétine, est une hormone facteur de croissance sécrétée par le cortex rénal.

En 1868, Adolphe Carnot a 29 ans et devient professeur de chimie à l'École des mines de Paris où il fera toute sa carrière. Adolphe Carnot y sera également directeur-adjoint à partir de 1882 puis directeur de 1901 à 1907, année de sa retraite. Il sera également professeur de géologie à l'Institut National Agronomique de 1876 à 1901. La fibre politique est également présente chez Adolphe Carnot, il est élu conseiller général de la Charente en 1898, et préside le conseil général de la Charente de 1902 à 1910.

En 1874, veuf depuis cinq ans, Adolphe Carnot épouse Mathilde Offroy-Durrieu (1842-1897) avec qui il aura deux enfants Marie (1877-1969) et Jean (1881-1869) qui sera ingénieur des Mines, député de la Charente de 1924 à 1928.

Adolphe Carnot est un chercheur, ainsi en 1898 il publie un *Traité d'analyse des substances minérales* qui rassemble ses recherches sur les méthodes d'analyse chimique et de dosage des substances minérales (figure 18). Il prend part à la découverte des minerais de bismuth dans le filon de Meymac en Corrèze, minerai qu'il étudie et analyse avec ses deux spécialités de chimiste et minéralogiste. Adolphe Carnot est alors un spécialiste de la chimie du bismuth. Le minerai de Meynac sera exploité quelques décennies à la fin du XIX^e début XX^e. Adolphe Carnot est également à l'origine de l'établissement de cartes destinées à l'agriculture en donnant les compositions des sols.

Adolphe Carnot meure en 1920 à Paris.

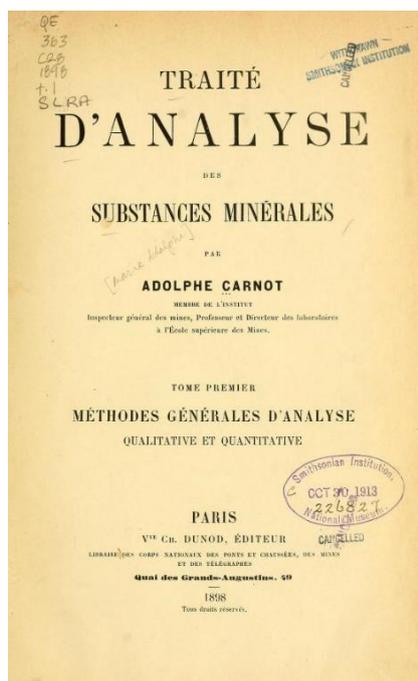


Figure 18 : « *Traité d'analyse des substances minérales* » édition 1898, source [27]



Figure 19 : Adolphe Carnot en 1908 (69 ans), source [28]

4 – Conclusion

Sadi Carnot est l'un des principaux pionniers de la thermodynamique, il a découvert les deux lois sur lesquelles reposent cette science, malgré la théorie erronée du calorique indestructible.

Sadi Carnot laisse donc son nom au second principe de la thermodynamique, au théorème relatif au rendement maximal des moteurs thermiques, à un cycle réversible et à une machine thermique idéale. Au XX^e siècle, son nom sera également donné à un cratère lunaire de 126 km de diamètre situé sur la face cachée ainsi qu'à un astéroïde de la ceinture principale (région du système solaire située entre l'orbite de Mars et celle de Jupiter) découvert en avril 1991. En 2006, la France créé

le label Carnot attribué à des laboratoires de recherche publique effectuant des travaux de recherche scientifique en partenariat public-privé, les Instituts Carnot [29].

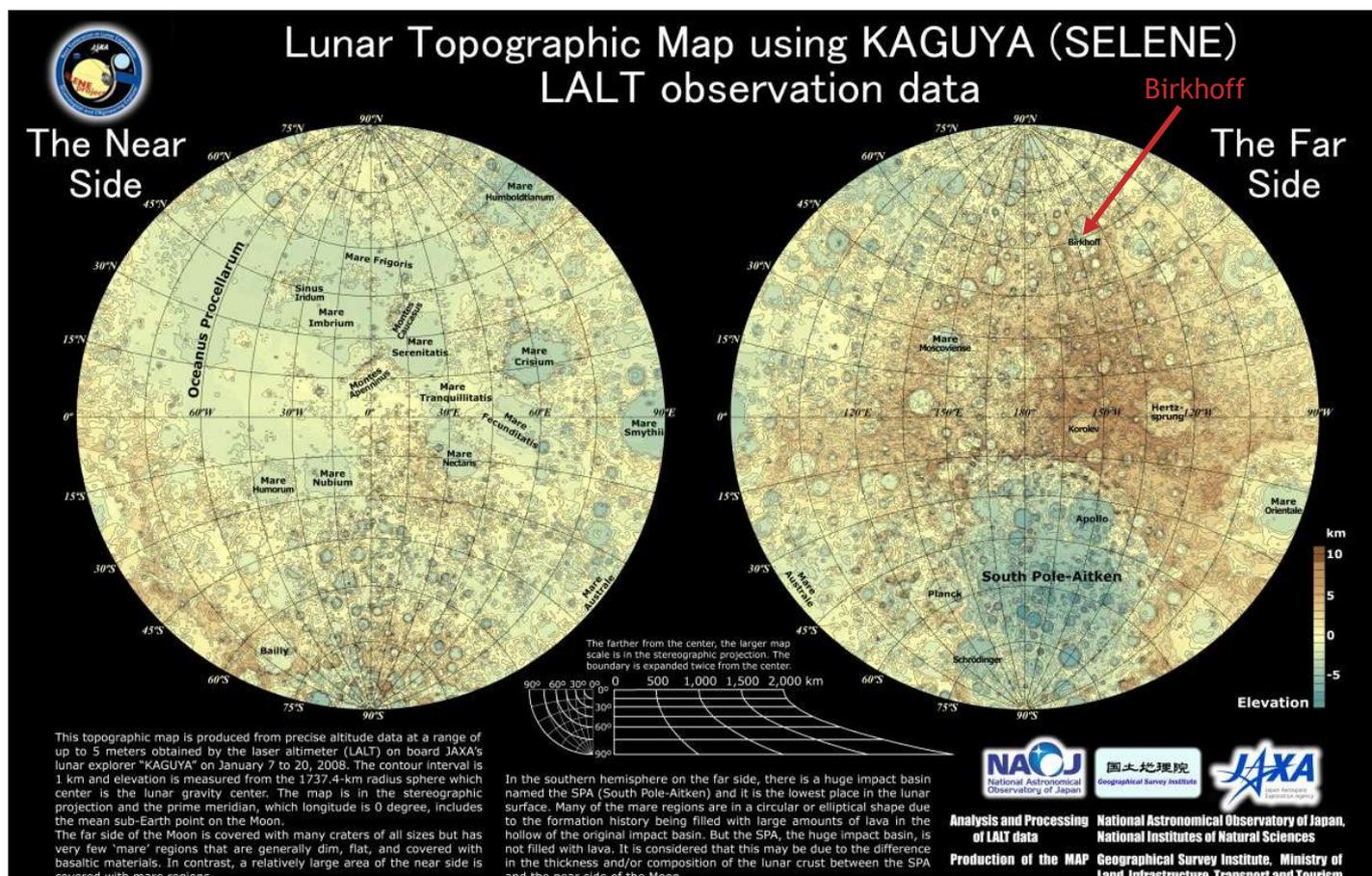


Figure 20 : Carte topographique lunaire, à gauche la face visible de la Terre à droite la face cachée. Le cratère Carnot se trouve sur la face cachée aux coordonnées 52° 18' 0" N, 143° 30' 0" O, sur le bord sud du très grand cratère Birkhoff, source [30]

Références :

- [1]: Sadi Carnot (physicien), [https://fr.wikipedia.org/wiki/Sadi_Carnot_\(physicien\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sadi_Carnot_(physicien))
- [2]: Sadi Carnot, Larousse, https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot/111814
- [3]: Lazare Carnot, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Lazare_Carnot
- [4]: Louis Léopold Boilly - <http://shows.we- envision.com/aa/2big/BOILLY,%20Louis%20L%C3%A9opold/BOILLY,%20Louis%20L%C3%A9opold.html>, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44885268>
- [5]: Le palais du Petit-Luxembourg, Tangopaso – Photographie personnelle, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45064867>
- [6]: <https://www.alamy.com/portrait-of-lazare-nicolas-marguerite-comte-carnot-1753-1823-museum-private-collection-image212355036.html>, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=577483>
- [7]: Sadi Carnot « Vers la maîtrise de l'énergie ... », rectorat de l'académie de Dijon, <https://www.nolay.com/app/uploads/2021/05/Expo-Sadi-Carnot-2018.pdf>
- [8]: Émile Clapeyron, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89mile_Clapeyron
- [9]: Émile Clapeyron, Larousse, https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/%C3%89mile_Clapeyron/111188

- [10]: Émile Clapeyron, Éditions Jacques Gabay, <https://www.gabay-editeur.com/AUTEURS/C/CLAPEYRON>
- [11]: Émile Clapeyron, Annales de l'École des mines, <https://www.annales.org/archives/x/clapeyron.html>
- [12]: Émile Clapeyron, Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur, Bibliothèque Nationale de France, Gallica, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3414331n.image>
- [13]: Hippolyte Carnot, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Carnot
- [14]: Annales Scientifiques de l'É.N.S, 2^e série, tome 1 (1872), p. 393-457, http://www.numdam.org/article/ASENS_1872_2_1_393_0.pdf
- [15]: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 1878, deuxième semestre, page 967-969, <http://visualiseur.bnf.fr/CadresFenetre?O=NUMM-3044&M=tdm>
- [16]: Nicolas-Léonard-Sadi Carnot, SABIX (Société des Amis de la Bibliothèque et de l'histoire de l'École polytechnique), <https://www.sabix.org/bulletin/b5/carnot.html> :
- [17]: Le Pyréolophore : un nouveau principe de moteur, maison Nicéphore Niépce, <https://photo-museum.org/fr/le-pyreolophore-un-nouveau-principe-de-moteur/>
- [18]: Journal de l'École royale polytechnique, vingt-deuxième cahier, Tome XIV, pages 153 à 190, Mémoire sur la Puissance motrice de la chaleur par E. Clapeyron, https://books.google.fr/books?id=1so6AQAAMAAJ&pg=RA1-PA153&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [19]: Carnot Sadi, un pionnier de la Thermodynamique, Encyclopédie Universalis, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/sadi-carnot/2-un-pionnier-de-la-thermodynamique/>
- [20]: Famille Carnot, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Famille_Carnot
- [21]: Hippolyte Carnot, Larousse, https://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Lazare_Hippolyte_Carnot/111812
- [22]: portrait Hippolyte Par Achille Devéria – <https://www.parismuseescollections.paris.fr/fr/musee-carnalet/oeuvres/galerie-des-representants-du-peuple-portrait-de-lazare-hippolyte-carnot#infos-principales>, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=125817247>
- [23]: Sadi Carnot (président), Wikipédia, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Sadi_Carnot_\(homme_d%27%C3%89tat\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sadi_Carnot_(homme_d%27%C3%89tat))
- [24]: Sadi Carnot, Élysée, <https://www.elysee.fr/sadi-carnot>
- [25]: Adolphe Carnot, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Adolphe_Carnot
- [26]: Annales de l'École des mines, <https://www.annales.org/archives/x/carnot.html>
- [27]: Traité d'analyse des substances minérales, A. Carnot, Éditions Dunod, 1898, Biodiversity Heritage Library, <https://www.biodiversitylibrary.org/item/125979#page/9/mode/1up>
- [28]: Adolphe Carnot, gravure dans l'Album Mariani, tome XI, 1908, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3397565>
- [29]: Dossier Repères recherche et Innovation, novembre 2021, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/dossier-reperes-recherche-et-innovation
- [30]: Selene produit la carte topographique de la Lune, février 2009, flashespace, http://www.flashespace.com/html/fev09/27_02_09.htm