

Notes de relecture et commentaires

Chaleur, énergie, thermodynamique

Le message de Carnot aujourd'hui... 200 ans après

Heat, energy, thermodynamics

Carnot's message today... 200 years later

Gilles Bertrand^{1,2}

¹ Professeur émérite Université Bourgogne-Europe, Laboratoire ICB

² Président du Conseil scientifique de l'Académie François Bourdon

RÉSUMÉ. Des premiers pas de la thermodynamique avec Carnot en 1824 aux avancées de la recherche aujourd'hui pour préparer demain. Cet ouvrage offre au lecteur une large vue d'ensemble de la thermodynamique à partir de 22 articles. Sont notamment abordés les aspects historiques de la thermodynamique et aussi la question du devenir de notre planète, les structures du monde vivant, les extensions prometteuses vers le monde quantique, les potentialités de l'énergie solaire. Sont aussi visités les moteurs, les matériaux avec un projet innovant en métallurgie des poudres. Bien d'autres pépites sont à découvrir. Il parle aussi de l'enseignement de la thermodynamique ou de la façon ludique de l'aborder par la BD. En bref un ouvrage très documenté sur l'actualité scientifique du message visionnaire de Carnot de 1824, ouvrant sur demain !

ABSTRACT. From the first steps in thermodynamics with Carnot in 1824 to today's research advances in preparation for tomorrow. This book offers readers a broad overview of thermodynamics through 22 articles. It covers the historical aspects of thermodynamics as well as the future of our planet, the structures of the living world, promising extensions into the quantum world, and the potential of solar energy. It also looks at engines and materials, with an innovative project in powder metallurgy. There are many other gems to discover. It also discusses the teaching of thermodynamics and how to approach it in a fun way through comics. In short, this is a well-researched work on the scientific relevance of Carnot's visionary message from 1824, opening the door to tomorrow!

MOTS-CLÉS. irréversibilité, entropie, planète, quantique, matériaux, solaire, moteurs, optique, chimie.

KEYWORDS. irreversibility, entropy, planet, quantum, materials, solar, motors, optics, chemistry.

1) En juin 1824 paraissait le petit livre « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance* » [2] d'un jeune capitaine du Génie (29 ans) Sadi Carnot, ancien élève de l'Ecole polytechnique comme l'indique la couverture. Cet événement figure dans le calendrier publié par France Mémoire parmi 53 anniversaires historiques retenus pour les commémorations nationales en 2024. Pourquoi ce livre-ci publié à compte d'auteur voilà 200 ans hors des circuits scientifiques retient-il l'attention aujourd'hui ? Si on interroge Google Scholar sur l'auteur Sadi Carnot, on constate que son ouvrage, seule référence qu'il ait publiée, est cité 1707 fois (réédition 1872), 314 fois (édition anglaise 1890), 247 fois (édition de 1824), 173 fois (édition Robert Fox 1980) et 23 fois dans l'édition allemande de 1980. En cliquant sur « *Sadi Carnot réflexions sur la puissance motrice* » ce sont 451 références publiées en 2024-25 qui émergent. Il y a donc bien une actualité pour cet ouvrage. Pourtant, c'est le seul écrit publié de Sadi Carnot qui décède prématurément en 1832.

Pourtant, il s'en est fallu de peu que l'ouvrage ne parvienne pas jusqu'à nous. Certes, il reçoit un accueil honorable, y compris à l'Académie des sciences où l'académicien Pierre-Simon Girard le présente à la séance du 14 juin 1824 et complète par un compte-rendu analytique [3] publié en juillet 1824. Mais il n'y eut pas de suites. À l'exception de Clément-Desormes qui, dans une conférence donnée le 25 janvier 1825, recommande à ses auditeurs de lire l'ouvrage, les physiciens et ingénieurs sont sans doute déroutés par des raisonnements fondamentaux basés sur les principes de la machine à vapeur.

L'étincelle se produit en 1834, dix ans après la parution des *Réflexions* ; **Émile Clapeyron** polytechnicien comme Carnot, publie un « *Mémoire sur la force motrice de la chaleur* » [4] dans le journal de l'École polytechnique explicitant les idées de Sadi Carnot, mémoire traduit en 1837 en anglais et en 1843 en allemand. Par ces ouvrages Sadi Carnot commence à influencer progressivement le corps scientifique. C'est Clapeyron qui représente dans un diagramme P-V le cycle de la machine idéale réversible conçu par Carnot et connu depuis comme **cycle de Carnot**. Il est professeur à l'École des mines de Saint-Étienne de 1832 à 1834 et entre là en possession d'une copie de l'ouvrage de Sadi Carnot. Il le cite dès la deuxième page de son mémoire : « *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 base 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...* ».

Les idées de Carnot, une fois redécouvertes, amènent **William Thomson** (1828-1907), devenu lord **Kelvin** en 1892, physicien britannique, à des travaux en thermodynamique avec notamment la compréhension et la formalisation du second principe. Il définit **l'échelle absolue des températures** en 1848 [5] (*"D'une échelle thermométrique fondée sur la théorie de Carnot de la Puissance Motrice de la Chaleur et calculée à partir des observations de Regnault"*). William Thomson raconte en note que, n'ayant pas pu se procurer un exemplaire des *Réflexions* il dut se contenter d'une traduction du mémoire d'Émile Clapeyron pour son article de 1848. 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 [6] qu'il dédie à Sadi Carnot, publié dans les *Transactions of the Edinburgh Royal Society* en 1849. C'est dans cet article qu'il crée le mot thermodynamique.

Rudolf Clausius (1822-1888) est un physicien prussien bien connu également pour ses contributions majeures à la thermodynamique. Dans son premier article « *Sur la force motrice de la chaleur et les lois qui s'en déduisent pour la théorie même de la chaleur* » de 1850 il précise en note « *Je n'ai pu me procurer cet ouvrage (de Sadi Carnot) et je ne le connais que par les travaux de Clapeyron et Thomson* ». En 1864 il ajoute : « *depuis j'ai pu me procurer cet ouvrage et j'y ai trouvé la confirmation des idées que je m'étais faites sur son contenu.* ». Il a reformulé l'énoncé du **second principe de la thermodynamique**. En 1865 [8] développant plus profondément ses théories, il introduit l'**entropie** $S = Q/T$ comme fonction d'état du second principe ayant donné l'énergie interne U pour le premier principe, fixant ainsi définitivement le cadre de la thermodynamique. Les travaux de Thomson et Clausius mettent aussi en accord la théorie dynamique de la chaleur (Joule) et les théories de Sadi Carnot.

Ainsi, bien que Sadi Carnot ne donne aucune indication montrant qu'il ait anticipé les principes qui sont à la base de la thermodynamique, il en est, sans aucun doute, le principal pionnier. En fait, comme l'a dit un bon juge, lord Kelvin, « *dans toute l'étendue du domaine des sciences, il n'y a rien de plus grand que l'œuvre de Sadi Carnot* ». (cité par Emile Picard, secrétaire perpétuel, en 1919 à l'Académie des sciences [9]).

2) Ce scénario étonnant qui nous transporte en deux siècles d'un livre introuvable et peu lu visant à écrire précisément la théorie des machines à vapeur au moment de leur développement à une science universelle encore fort prometteuse cherchant à dépasser la civilisation thermo-industrielle qu'elle a engendrée mérite qu'on y consacre un moment pour le saisir, l'analyser et le prolonger. Voilà en effet l'objectif que s'est fixé Carnot à l'ouverture de son œuvre :

p.6 – *Malgré les travaux de tous genres entrepris sur les machines à feu, malgré l'état satisfaisant où elles sont aujourd'hui parvenues, leur théorie est fort peu avancée.*

p.8 – *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.*

et voilà aussi les perspectives qu'il ouvre

p.2- *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.*

p.2- *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.*

Dans ce contexte l'Académie François Bourdon du Creusot a décidé d'organiser en 2024 un colloque sur le thème "**Le message de Carnot aujourd'hui... 200 ans après**". Des raisons ? 1) Le site du Creusot est typiquement un site industriel né du développement de la société thermo-industrielle personnalisée ici par le patronyme Schneider 2) L'Académie bénéficie d'un dépôt d'archives de la famille Carnot venant de Gaétan Carnot président de la Fondation Carnot en 2005 avec notamment le fameux ouvrage de 1824 3) le berceau de la famille Carnot est Nolay, village situé à une trentaine de kilomètres du Creusot, où est né Lazare Carnot, père de Sadi, et où Sadi venait volontiers 4) A l'Université Bourgogne Europe est implanté le **Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UMR 6303 CNRS-uBE-UTBM** qui est étroitement associé au projet. Il regroupe 300 scientifiques, ingénieurs et techniciens en physique, chimie et sciences de l'ingénieur de la région Bourgogne - Franche Comté (Dijon, Le Creusot, Chalon-sur-Saône, Belfort-Sevenans). Ses recherches interdisciplinaires sur "la lumière et la matière" ont pour toile de fond la thermodynamique.

La conférence a eu lieu le jeudi 21 novembre et le vendredi 22 novembre 2024 au Creusot....Son programme comprenait 5 conférences plénières, 13 communications, 1 table ronde sur la bande dessinée "l'entropie fatale", 8 posters et 1 exposition.

L'appel à communication visait trois rubriques :

1. Les concepts et idées issus de l'œuvre de Sadi Carnot : machines et développement industriel, théorie de la machine à vapeur (cycle de Carnot, rendement maximum), impossibilité du mouvement perpétuel, réversibilité et second principe, dégradation de l'énergie et entropie, équivalence chaleur-travail, conservation de l'énergie, échelle thermodynamique des températures (Kelvin).
2. La chaleur et l'énergie dans l'industrie et la recherche : métallurgie, mécanique, énergie nucléaire, chimie, centres de données....
3. Les enjeux contemporains : le réchauffement climatique, la civilisation thermo-industrielle, la sobriété énergétique, les énergies renouvelables, la transition énergétique, les pompes à chaleur, l'énergie positive, la thermodynamique solaire, la thermodynamique quantique.

3) Les Actes de ce colloque sont rassemblés dans l'ouvrage [1] **Chaleur, énergie, thermodynamique : Le message de Carnot aujourd'hui... 200 ans après** objet de cette note de lecture. Nous vous souhaitons de bons moments avec les auteurs de textes passionnants et en pleine actualité. Il s'adresse à un public scientifique généraliste curieux de découvrir les multiples facettes de l'héritage de Sadi Carnot, il est donc ouvert à la diversité des usages et développements de la thermodynamique avec la volonté d'offrir un recueil pluridisciplinaire. Je suis moi-même spécialiste de thermodynamique irréversible formé à l'école de Ilya Prigogine. Chaque thème ne sera traité que par une ou deux communications et l'objectif est de faire dialoguer les thèmes. Ainsi les 5 conférences explicitent un historique de Carnot à aujourd'hui, une vision prospective, la thermo quantique, l'ouverture vers la biologie et enfin une application à la science des matériaux métalliques.



Figure 1. La couverture de l'ouvrage « chaleur, énergie, thermodynamique, le message de Carnot aujourd'hui... 200 ans après » avec 1) un extrait d'une gravure d'après une peinture de Pierre Trémaux « Le Creusot 1847 », 2) le portrait de Sadi Carnot en habit de polytechnicien en 1813 par Louis Léopold Boilly, 3) la couverture de l'ouvrage de 1824, Gallica 4) illustration éolienne et panneau photovoltaïque au Soleil générée par IA, Photoshop

Peut-être le lecteur pressé n'aura pas noté la dédicace qui reprend un passage visionnaire que **Lazare Carnot**, père de Sadi écrivait en 1784 (lettre sur les aérostats adressée à l'Académie des sciences) sur l'avenir de la machine à feu. Notre ouvrage s'ouvre ensuite sur une note de présentation du contexte, **l'Académie François Bourdon (AFB)**, ses activités, ses archives et notamment le fonds Carnot, et sa participation aux célébrations de 2023 et 2024 par **François-Yves Julien**, archiviste à l'AFB et **Gilles Bertrand**, président du Conseil scientifique de l'AFB et organisateur des célébrations au Creusot.

Gaétan Carnot et **Lionel Carnot** son fils, ont bien voulu **préfacier l'ouvrage** ; Gaétan Carnot est président de la Fondation Carnot, arrière-petit-fils du président Sadi Carnot, dont le physicien Sadi Carnot était l'oncle. Lionel Carnot est membre du comité exécutif de la Fondation Carnot. Il était important et intéressant de recueillir en préambule ce témoignage de membres de la famille Carnot. Il fait ressortir le rôle joué par Lazare sur l'éducation, la vocation et « *une curiosité pour les sciences et une conscience des enjeux de son époque* » de son fils Sadi. Il situe l'impact fondateur des « *Réflexions* » sur le développement de nombreuses disciplines scientifiques et technologiques et même dans notre quotidien où les applications sont omniprésentes et constate que son héritage se perpétue aujourd'hui dans de nombreux domaines citant notamment la thermodynamique quantique, marquant la pertinence et la profondeur de ses idées. Il récapitule les célébrations du bicentenaire, dans un contexte où Sadi Carnot est « *considéré à l'étranger comme l'un des plus grands savants français alors qu'en France il est peu connu en dehors des milieux scientifiques* ». Enfin les auteurs évoquent la campagne lancée pour « *donner une place (au Panthéon) à celui qui est probablement un des plus grands savants de la Nation.* »

4) Cinq conférences ont marqué les diverses séquences du colloque ; elles sont rassemblées en tête de l'ouvrage et forment son identité. **Gilles Henri** professeur en astrophysique à l'université Grenoble-Alpes a écrit qu'il est « *impossible de comprendre les phénomènes réels, de la machine à vapeur au trou noir et à l'univers primordial sans connaître le développement conceptuel pratique et théorique de la thermodynamique* ». Il propose ici une synthèse rigoureuse des concepts et idées qui ont conduit « **d'une simple question d'ingénieur à la compréhension de l'irréversibilité** ». Les contradictions qui n'ont pas manqué d'être relevées au cours de cette histoire sont analysées et leurs solutions expliquées. C'est l'occasion d'évoquer le fameux démon de Maxwell que l'on retrouvera plus loin et de parler de la vie et de l'ordre qui la caractérise (la néguentropie). La référence aux travaux d'Ilya Prigogine, prix Nobel 1977, est appropriée. Les questions contemporaines nées de la relativité et de la mécanique quantique sont aussi abordées et l'auteur ne pouvait conclure sans un clin d'œil aux trous noirs l'une de ses spécialités.

Joël Chevrier, physicien de la matière condensée à l'Université Grenoble-Alpes mais aussi directeur scientifique de la *Design Factory* à Grenoble avait la responsabilité de poursuivre l'histoire en regardant

la réalité en face en prenant au mot la vision de Sadi Carnot : « *elles (les machines à feu) paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé* » ; il annonçait donc un changement du monde et il a eu lieu ; **la civilisation thermo-industrielle a envahi la planète et changé le monde**. Ce constat est commenté sous deux angles inédits, l'un est celui de l'art dont Joël Chevrier est expert [11] (*un physicien au musée* 2023, quand l'art et la science se croisent) à partir de l'analyse d'une exposition parisienne de 2024 « *Arte povera* » qui interpelle la civilisation thermo-industrielle, l'autre à partir de données scientifiques publiées notamment sur la consommation énergétique planétaire et la lecture qui peut en être faite au regard du rapport Meadows et là de nouveau Carnot est interrogé : « *c'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur terre....et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie.* » La grande machine énergétique sur la Terre est bien celle qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, en mouvement et en vie... voilà bien la piste à creuser et à consolider.

Thermodynamique quantique...Il s'agissait bien d'une terre inconnue voilà quelques années bien que les premiers travaux datent des années 60. J'avais même appris et enseigné que la thermodynamique s'appliquait à la physique macroscopique mais pas à la physique quantique ou particulaire. Mais tout a changé ; en 2023 *CNRS Physique* publiait une information [12] sur la thermodynamique 100%quantique annonçant l'article paru dans *PRXQuantum* [13] le 18 avril 2023. C'est avec une impatiente curiosité que j'ai écouté l'un des auteurs de cet article **Camille Lombard Latune**, qui a rejoint le laboratoire ICB depuis, nous exposer un panorama de ce domaine en plein essor qu'est la thermodynamique quantique et ouvrir des perspectives. Son coauteur de 2023 Cyril Elouard qui a rejoint l'université de Lorraine vient de gagner une bourse ERC Starting Grant pour son projet de recherche QARNOT. La surprise est de retrouver l'ensemble du vocabulaire de la thermodynamique avec le même usage pour ces systèmes à quelques particules : chaleur, travail, cycle de Carnot, machines thermiques, moteurs, rendement, irréversibilité, entropie. L'auteur attire cependant notre attention sur les effets quantiques et d'éventuels avantages quantiques. Et de conclure que la thermodynamique quantique se veut de jouer le rôle qu'à jouer la thermodynamique dans la révolution industrielle ; optimiser les ressources disponibles pour atteindre les meilleures performances technologiques possibles. »

Notre quatrième volet porte sur la **thermodynamique des systèmes biologiques** avec notamment les **phénomènes d'auto-organisation**. Avec **Albert Goldbeter** professeur à l'Université libre de Bruxelles nous avons eu un auteur au cœur de cette problématique, bien connu pour son livre « *la vie oscillatoire, au cœur des rythmes du vivant* » [14]. il rappelle tout d'abord que Léon Brillouin dans son livre « *Vie, Matière et Observation* » [15] publié en 1959, pose d'emblée la question : « *Comment peut-on comprendre la vie alors que le monde entier est régi par une loi telle que le second principe de la thermodynamique, ou principe de Carnot, qui aboutit à la mort et à la destruction totale ?* » Cette question est au cœur des travaux de thermodynamique de non-équilibre qui ont valu à Ilya Prigogine le Prix Nobel de Chimie en 1977. Prigogine a montré qu'au-delà d'une instabilité correspondant à une bifurcation, les systèmes chimiques ouverts sont capables de s'auto-organiser dans le temps et/ou dans l'espace sous forme de **structures dissipatives** [16]. Celles-ci trouvent de multiples illustrations en physique et en chimie, et plus encore dans les sciences du vivant. L'auteur montre ici comment le fonctionnement des systèmes vivants repose en partie sur leur capacité à se structurer dans le temps, comme le montre l'abondance des rythmes biologiques, et dans l'espace, comme l'attestent les phénomènes de propagations d'ondes et d'autres types d'organisation spatiale au niveau supra-cellulaire. Les systèmes ouverts loin de l'équilibre ont également la capacité de basculer entre différents états simultanément stables ; cette multi-stabilité sous-tend, par exemple, la différenciation cellulaire. Les systèmes vivants représentent le domaine par excellence des structures dissipatives en raison de leur non-linéarité qui trouve sa source principale dans les processus de régulation apparus au cours de l'évolution biologique. L'auteur conclut en réaffirmant que l'extension de la Thermodynamique aux processus de non équilibre permet de réconcilier la dynamique du vivant avec la loi de Carnot et le second principe.

Albert Goldbeter nous a également offert le poème inédit « **Ode à Sadi Carnot** » qu'il avait composé au printemps 1967 alors qu'il était étudiant.

Machines et puissance motrice du feu ont fait la réputation de l'industrie du Creusot [17] qui poursuit son développement thermo-industriel en innovant. C'est précisément à un projet phare implanté au Creusot qu'est consacrée la cinquième conférence. Il s'agit de la création d'une plateforme nationale appelée **CALHIPSO** (EquipeX+ CALHIPSO (Compaction et Assemblage d'alliages métalliques par HIP (Hot Isostatic Pressing) une Solution InnOvante) qui vise à mettre en œuvre et à promouvoir la **technologie « Compression Isostatique à Chaud (CIC) »** [18] dans l'industrie métallurgique. Le regain d'intérêt pour la **métallurgie des poudres**, la demande croissante de composants complexes ainsi que les progrès récents de la technologie sont favorables à l'expansion de cette approche pionnière dans de nombreux secteurs de l'industrie. Au colloque ce thème a fait l'objet de 6 présentations réunies ici en un seul article. **Frédéric Bernard**, Professeur de Chimie Physique à l'Université Bourgogne Europe (uBE) et membre du laboratoire ICB, est le promoteur du projet CALHIPSO qui associe des partenaires démontrant une longue expérience dans la mise en œuvre de la technologie CIC. L'article qu'il cosigne avec son équipe propose une approche complète de cette technologie, depuis ses principes scientifiques jusqu'à la mise en œuvre en passant par l'expérimentation à haute température (2000°C) et haute pression (2000 bar, 200 MPa) et la modélisation. Il s'intéresse notamment aux deux applications (i) pour la fabrication de composants frittés au plus proche des dimensions finales et (ii) pour la réalisation d'assemblages de composants complexes par diffusion. D'entrée de jeu est posé le contexte thermodynamique qui montre que **l'énergie de Gibbs** d'une poudre est supérieure à celle du compact et donc que naturellement la poudre doit se densifier, Toutefois, ce processus étant infiniment lent dans les conditions ambiantes, il convient, pour des applications industrielles, de l'aider en chauffant et en comprimant. C'est le procédé connu **de frittage (sintering)** qui se caractérise par un transport de matière par diffusion, la formation d'interfaces solide/solide en lieu et place d'interfaces solide/gaz dont les énergies sont généralement plus élevées. Il s'agit de le rendre rapide et optimal et c'est l'objet de la CIC. Au-delà du principe simple énoncé ci-dessus il y a une mise en œuvre complexe de la modélisation qui nécessite la connaissance des propriétés thermodynamiques des matériaux, et des mélanges de gaz et leurs propriétés de transport, le maniement des équations de comportement appropriées à la situation. L'exposé structure cette mise en œuvre autour de plusieurs défis : *Défi n°1 - Comprendre et modéliser les mécanismes de densification à différentes échelles de poudres et d'interfaces*. Ici la confrontation des résultats de simulation avec le scan final de la pièce réelle est particulièrement probante. *Défi n°2 - Comprendre le rôle de la microstructure et de la morphologie des poudres lors du cycle de CIC*. *Défi n°3 - Comprendre et modéliser l'évolution de la microstructure des matériaux et des interfaces lors du soudage diffusion*. *Défi n°4 – Instrumentation* : L'instrumentation des procédés CIC consiste à mesurer « in situ » simultanément la déformation et la température des matériaux. Ces données, difficiles à acquérir dans un environnement CIC, sont essentielles pour valider les modèles. *Défi n°5 - Technologie d'encapsulation* : La fabrication de pièces complexes par CIC nécessite en effet l'utilisation d'une capsule étanche qui transmet la pression à la poudre métallique contenue dans celle-ci tout en évitant l'introduction de gaz dans les vides. *Défi n°6 – Industrialisation* : la technologie CIC-poudre étudiée au sein de Framatome depuis 2008 par le biais de sa R&D interne a abouti à la production réussie d'un démonstrateur de grandes dimensions Échelle 1:1 en 304L CIC. Ce projet marque le passage d'un important jalon vers la standardisation et l'industrialisation de la CIC-poudre dans l'industrie nucléaire.

Au bilan, la technologie CIC montre sa capacité à élaborer des composants avec des performances et des durabilités améliorées c'est-à-dire avec un taux de densification proche de 100% sans ségrégation et présentant une microstructure fine, homogène et isotrope. Il est à noter que ces procédés génèrent aussi des économies de matières premières, et donc des économies d'énergie. Ainsi, CALHIPSO propose une approche globale d'expérimentation, de modélisation et de simulation (multi-échelles et multi-physiques) mettant à profit les théories et données thermodynamiques pour définir des solutions taillées à la mesure des besoins de la recherche et de l'industrie.

5) « *Personne n'ignore que la chaleur peut être la cause du mouvement, qu'elle possède même une grande puissance motrice* » ; cette phrase ouvre les « *Réflexions* » de Sadi Carnot. **Daniel Suchet**, maître de conférences à l'Ecole Polytechnique et chercheur à l'Institut Photovoltaïque d'Ile de France, est remonté à la source de cette chaleur, c'est à dire le Soleil, pour la retrouver dans le rayonnement solaire sur terre et étudier sa conversion en puissance motrice [19]. C'est cette étape qu'il retrace dans l'article

qu'il cosigne « **Réflexions sur la puissance motrice du Soleil** » ; Tout part de la loi de Stefan-Boltzmann pour estimer à 1000 W/m² la puissance reçue par unité de surface au sol soit une puissance moyennée sur l'année de 150 W/m² soit une manne de 20000 TW au total des terres émergées. Le rendement de la machine solaire (machine de Moser) dont l'absorbeur parfait (corps noir) convertirait cette chaleur en travail serait limité à 7%. Cette limite peut être dépassée dans une machine à concentration où le rendement peut atteindre 86% ...si l'absorbeur supporte une température de l'ordre de 3000°C. Mention est faite du moteur solaire d'Augustin Mouchot, enfant de Semur en Auxois né en 1825, présenté en 1866 [20]. Une autre démarche consiste à utiliser l'effet photovoltaïque dans une machine (cellule) solaire photovoltaïque, objet de nombreuses recherches aujourd'hui ; le rendement maximal espéré est proche de 30%. La thermodynamique et notamment le second principe sont très présents dans ce solaire moteur.

La fameuse formule du rendement de Carnot ne figure pas dans les « *Réflexions* ». Carnot affirme, et c'est nouveau que la puissance motrice est limitée par une borne supérieure atteinte dans des conditions réversibles : *p.22 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.* Il démontre que cette limite ne dépend ni de la machine, ni de l'agent mais seulement de l'écart des températures des deux réservoirs en lesquels se fait le transport du calorique. Il écrit p.28 : *Dans la chute du calorique la puissance motrice augmente sans doute avec la différence de température entre le corps chaud et le corps froid ; mais nous ignorons si elle est proportionnelle à cette différence.* Pourtant Pierre-Simon Girard porte dans sa notice bibliographique [3] notre attention sur ce qu'écrit Sadi Carnot page 116 (en fin d'ouvrage) de ses *Réflexions* : « *l'auteur rappelle qu'1 kg de charbon brûlé dans un calorimètre peut fournir 7000 unités de chaleur, à l'aide desquelles on pourrait d'après la théorie produire au moins 3920 unités de force motrice. Or dans les machines les plus parfaites que l'on ait exécutées jusqu'à présent 1 kg de charbon ne fournit que 195 de ces unités de force* ». Précisément, **Luis Le Moyne** professeur à l'Institut supérieur de l'Automobile et des Transports à Nevers, ISAT, nous propose un texte sur « **l'invention et l'évolution de la notion de rendement thermodynamique** ». Il nous rappelle que bien que l'objectif affiché des « *Réflexions* » soit bien de chercher le maximum de production de puissance, le chemin vers la notion de rendement sera encore long, et le texte de Carnot concerne bien davantage les lois de la transformation de l'énergie que le rendement des machines, terme d'ailleurs encore inexistant à l'époque. L'auteur attribue à William Rankine et Gaspard Hirn l'invention du « rendement », production de puissance comparée à la chaleur consommée. Progressivement, le terme « rendement » s'étend aux domaines de l'économie et de la gestion des ressources et devient un concept étendu. Le travail de Carnot se révèle donc être non seulement un modèle pour l'ingénierie thermique, mais aussi une philosophie de l'optimisation à l'ère industrielle L'exemple du secteur automobile, piloté par le souci d'une réduction des émissions toxiques, adoptera des formes alternatives de rendement comme la masse de polluants émis par kilomètre parcouru. Ainsi les moteurs voient apparaître des nouveaux critères de qualification, de nouveaux concepts de rendement. Un exemple en est l'EROEI (Energy Returned On Energy Invested), qui mesure l'énergie produite par rapport à celle nécessaire pour l'extraire. En cela, les principes thermodynamiques posés par Carnot et ses successeurs servent de guide pour concevoir des systèmes efficaces, à l'heure où les enjeux environnementaux imposent une nouvelle gestion de l'énergie.

Hugo Pancin, doctorant du laboratoire DRIVE de Nevers propose avec Luis Le Moyne un texte sur le **pari du rétrofit**, transformation des moteurs diesel existants pour fonctionner à l'hydrogène. Le rétrofit dihydrogène présente l'avantage de supprimer les émissions de CO₂ et de particules fines tout en prolongeant la durée de vie des moteurs. Cependant, des défis techniques demeurent pour éviter l'auto-inflammation et les émissions d'oxydes d'azote. Un modèle thermodynamique et des essais expérimentaux montrent que l'injection combinée d'hydrogène et d'eau permet d'améliorer le rendement tout en réduisant les émissions de polluants. Ces résultats ouvrent la voie à une utilisation plus large de l'hydrogène dans les moteurs thermiques convertis, contribuant à la transition énergétique.

Ce que Carnot appelle puissance motrice est en fait une énergie et plus précisément un travail. Elle est extraite de la chaleur que fournit la source chaude et dans des conditions idéales cette puissance est

maximale. Comment caractériser cette énergie utilisable, convertible en travail. Un mot a été inventé en 1956 **Exergie** [21,22]. **François Lanzetta** professeur à l'université technologique de Belfort-Montbéliard et membre du laboratoire FEMTO-ST nous propose de reprendre en détail l'histoire de l'exergie, sa définition scientifique exacte à partir du premier et du second principes de la thermodynamique et son utilité pour bien spécifier l'énergie utilisable non seulement en quantité mais aussi en qualité. Performance, optimisation, rendement, efficacité, valorisation. L'exemple d'un échangeur de chaleur air/air pour la climatisation permet d'illustrer le propos et de concrétiser le concept et la méthode. La destruction d'exergie ou production d'entropie explicite les phénomènes dissipatifs, nuisibles à l'efficacité exergetique.

Dans son article d'octobre 1848 [5] « *On an **Absolute Thermometric Scale** founded on **Carnot's Theory** of the Motive Power of Heat and calculated from Regnault's Observations* » William Thomson futur Lord Kelvin annonce clairement « *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* ». Il explicite ensuite les preuves de son affirmation. Ainsi, avec cette idée de zéro absolu (0K) survient le monde fascinant de la **cryogénie** que l'énorme machine du CERN, le grand collisionneur de hadrons, LHC, nous permet de découvrir à une grande échelle. **Benjamin Bradu**, section leader of LHC, fait ici une présentation magistrale du **LHC (Large Hadron Collider)** le plus grand accélérateur de particules au monde et une des machines les plus sophistiquées jamais construites par l'homme. Il a été conçu pour répondre à certaines des questions les plus fondamentales de la physique des particules. Une des particularités du LHC est que, pour fonctionner, il doit être maintenu à une température proche du zéro absolu. C'est donc 36 000 tonnes de métal sur 27 km de circonférence qui doivent être **refroidis à 1,9 K**, exploitant les principes de la thermodynamique élaborés par Sadi Carnot il y a près de deux siècles. L'article nous décrit toutes les astuces scientifiques et technologiques qu'il a fallu inventer pour réussir ce pari et rendre ce réfrigérateur géant faisable et acceptable.

Avec l'exposé de **Vincent Lemort**, professeur à l'Université de Liège nous découvrons un autre type de machine thermique, la **batterie de Carnot, technologie prometteuse de stockage de l'électricité** sous forme de chaleur. Pendant le processus de charge, de l'électricité est convertie en chaleur et celle-ci est transférée dans la batterie ; pendant la phase de déstockage, l'inverse se produit. Le concept breveté voilà 100 ans en 1924, n'a été que récemment relancé pour le stockage de l'énergie produite par des sources renouvelables intermittentes. Le nom de « batteries de Carnot » a été proposé en 2018 avant la première conférence internationale consacrée à ces systèmes à Stuttgart [23], réunissant la référence à la réversibilité du moteur thermodynamique en pompe à chaleur décrite par Carnot dans les *Réflexions* (p.16) , et celle aux systèmes de stockage électrochimiques. Dans cet article, différents développements de prototypes et applications de batteries de Carnot sont présentés, soulignant les nombreux enjeux de recherche et développement, en lien avec les limites de la thermodynamique. Un champ d'application concerne les sites en réseau isolé. L'exemple donné est celui d'une batterie de Carnot intégrée dans une ferme au Nigéria, ferme qui est connectée à un réseau électrique peu fiable. La batterie de Carnot produit du froid et du chaud. La chaleur est stockée sous forme sensible et le froid est stocké sous forme de glace. L'électricité est utilisée pour entrainer des pompes d'irrigation et un système d'éclairage. Le stockage de froid est lui utilisé pour couvrir en partie la demande de froid pour la conservation des aliments.

Comme on vient de le voir, les écrits de Carnot ont inspiré directement des recherches d'aujourd'hui. D'autres sont issus du corpus construit pour donner corps à la thermodynamique. Les prochains articles relèvent plutôt de ce registre. Ainsi **Philippe Grelu**, professeur à UBE qui vient d'être élu Fellow Optica pour 2025 est spécialiste de photonique non-linéaire notamment pour ses recherches approfondies sur les solitons dissipatifs et les instabilités dynamiques dans les lasers à fibre ultrarapides. C'est précisément le thème qu'il a retenu pour son article **Structures dissipatives en optique : solitons et auto-organisation dans les lasers ultrarapides**. Il rappelle que le laser est un système non-linéaire, ouvert et dissipatif, ce qui lui permet de fonctionner sur de nombreux régimes différents, parmi lesquels les régimes d'impulsions optiques ultracourtes présentent une structuration temporelle résultant d'une auto-organisation. Il retrouve ainsi des points communs remarquables avec les avancées conceptuelles de

Turing [24] et de Prigogine [16] (voir l'article d'Albert Goldbeter ci-dessus) concernant l'auto-organisation dans les systèmes ouverts. Les notions d'attracteurs et de bifurcations sont centraux dans cette description, qui par ailleurs associe en correspondance plusieurs catégories de solitons dissipatifs, ainsi que leurs superstructures, telles que les molécules de solitons optiques.

Avec l'article de **Théo Torres et al** nous entrons dans le monde de la **thermodynamique de systèmes optiques non-linéaire** avec la propagation d'ondes optiques dans une fibre optique multimode étudiée aussi théoriquement qu'expérimentalement. Les auteurs montrent que le champ optique thermalise au cours de sa propagation vers la distribution d'équilibre thermodynamique de Rayleigh-Jeans. Plus précisément, le système exhibe une transition de phase vers l'état condensé, lequel se manifeste par une population macroscopique du mode fondamental de la fibre optique. Les propriétés thermodynamiques de la condensation d'ondes classiques sont brièvement discutées, ainsi que ses différences avec la condensation de Bose-Einstein quantique. L'étude fait apparaître une curiosité thermodynamique, **la température absolue négative** [25,26]. Il faut revenir à la définition de la température thermodynamique comme l'inverse de la dérivée de l'entropie par rapport à l'énergie interne ; en physique classique celle-ci est positive. Mais dans l'exemple des lasers où l'on observe une inversion de population, c'est à dire où la population des niveaux d'énergie supérieurs est plus grande que celle des niveaux inférieurs, alors l'entropie décroît lorsque l'on augmente l'énergie du système et donc la température formelle est négative. Mais en fait les systèmes à température négative sont plus chauds que tout système à température positive.

Olivier Politano et al s'intéressent à une formulation récente de la thermodynamique, basée sur la notion de chemin dans l'espace d'états (**path thermodynamics**) et appliquée aux systèmes réactifs isothermes hors d'équilibre [27]. A l'aide de simulations de dynamique moléculaire (DM), les auteurs testent les limitations de cette approche dans le cas où différentes réactions donnent lieu à la même transition. Contrairement à l'entropie de Boltzmann, basée sur les propriétés du système à un instant donné l'entropie de chemin est définie le long de la trajectoire suivie par le système sur un intervalle de temps. Les résultats des simulations microscopiques démontrent sans équivoque que les trajectoires d'un système réactif peuvent présenter une réversibilité temporelle, même lorsque le système est délibérément maintenu hors d'équilibre. Grâce à l'approche par DM, les auteurs montrent que ce n'est pas un artefact d'une théorie mais une propriété étonnante d'une classe spécifique de modèles parmi les systèmes réactifs isothermes.

Yevgeniy Kviring et al, du laboratoire ICB, proposent en anglais un travail précis de calcul par dynamique moléculaire d'une grandeur thermodynamique, le volume moléculaire partiel, dans l'exemple de **l'interaction de la glycine avec l'eau surfondue**. Ils examinent notamment sa variation pour chaque composant en fonction de la concentration en glycine (0 à 30% en masse) et de la température (298 K à 248 K) sous la pression normale. Les résultats montrent l'évolution de la réduction du volume de l'eau due à l'attraction entre l'eau et la glycine et de l'aggrégation entre les molécules de glycine prouvée par l'augmentation de volume avec la concentration. A noter la présence de cet acide aminé glycine dans la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko détecté par la sonde ROSINA [28].

Mario Maglione, directeur de recherches CNRS à Bordeaux, est codirecteur du Programme d'Equipements Prioritaires et de Recherche **DIADEM** (Dispositifs Intégrés pour l'Accélération du Déploiement de **Matériaux Emergents**) sélectionné par un jury international en 2021. Ce programme a pour ambition d'accélérer la découverte et le déploiement de nouveaux matériaux. Comme le proposent les auteurs, c'est de « **la thermodynamique à tous les étages** ». Les plateformes mises en place depuis 2022 ont pour objectif la synthèse et la caractérisation accélérée des matériaux autour d'une infrastructure numérique centrée sur le partage des données, la modélisation et l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA). Comme toujours, la synthèse, la mise en forme et la modélisation de matériaux avancés requiert une connaissance et un contrôle des paramètres thermodynamiques des procédés. Parmi les 34 projets déjà en cours, trois exemples sont plus particulièrement décrits : 1)-La métallurgie, en particulier celles des **Alliages à Haute Entropie (HEA*)** qui nécessite la mise en œuvre de modélisations thermodynamiques pour orienter les expérimentateurs au sein de diagrammes de phases

de très haute complexité. 2)-Le dépôt de **couches minces fonctionnelles** avec un contrôle *in situ* des paramètres thermodynamiques permettant un ajustement continu des paramètres des procédés. 3)-La **micro-fluidique** pour laquelle la faible taille des réacteurs implique une interaction forte entre les paramètres thermodynamiques Pression et Température et le flux des réactifs.

Autre regard sur la thermodynamique des matériaux, celui porté par l'équipe PMDM du laboratoire ICB que décrit **Olivier Politano** dans « **La thermodynamique calculatoire : un outil pour développer les matériaux du futur** ». En effet, pour répondre à la question : quel matériau pour quelle application, cette équipe a recours à la thermodynamique calculatoire. 1)-Un outil nommé CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) permet de déterminer les phases d'équilibre pour un système donné à plusieurs composants, en fonction de la température. Il est utilisé en amont des expériences comme un outil prédictif ou en aval pour expliquer les microstructures observées en fonction des conditions d'élaboration. L'exemple pris pour l'article est l'usage de CALPHAD pour l'étude d'HEA*, alliages à haute entropie, composés de Al, Co, Cr, Fe et Ni afin d'évaluer l'influence du procédé d'élaboration sur le matériau final. 2)- Un autre logiciel Thermo-Calc®, permet de réaliser également ces calculs thermodynamiques en utilisant des bases de données spécifiques à une famille d'alliages. Pour illustrer cette démarche l'exemple retenu porte sur le développement de couches barrière contre la diffusion du carbone venant de l'outillage en graphite pendant le procédé frittage flash.

**Rappelons ici qu'en 2004, un scientifique taiwanais, J-W Yeh, a eu l'idée de fabriquer un alliage à base de plusieurs éléments, au moins 5, dont la composition dans l'alliage varie entre 5% et 30% at.. Yeh a inventé l'alliage à haute entropie (HEA) [29]. Mélangés à l'échelle microscopique, les métaux forment une solution solide remarquablement stable. L'explication est thermodynamique. Un alliage est d'autant plus stable que l'énergie libre de Gibbs de mélange est faible. Contrairement aux alliages traditionnels, dans un HEA c'est le terme entropique de l'énergie de Gibbs qui l'emporte par rapport au terme enthalpique. Cette découverte révolutionne la conception des matériaux métalliques et ouvre des perspectives d'innovation impressionnantes. L'étude des Alliages à Haute Entropie (AHE) est l'un des domaines les plus dynamiques de la recherche en science des matériaux.[30]*

Lauryn Postec, Iryna Tomashchuk et al du laboratoire ICB ont étudié la **fonctionnalisation de surface de titane** dans un milieu aqueux à l'aide de lasers d'impulsion nanoseconde Nd:YAG qui permettent de produire des couches superficielles d'insertion d'éléments légers présentant des caractéristiques morphologiques diverses et trouvant des vastes applications. Le système H-O-Ti modélisé sous Thermo-Calc montre les mêmes phases que le système binaire Ti-O, mais contrairement au système titane-air, les sous-oxydes TiO et Ti₂O₃ seraient thermodynamiquement instables dans l'eau. Dans un premier temps, le traitement a été réalisé selon des lignes d'impacts laser à l'air et dans l'eau. Les lignes réalisées dans le milieu aqueux présentent un taux d'insertion d'oxygène plus important que les lignes réalisées dans l'air, ce qui est dû aux facteurs thermodynamiques ainsi qu'à la dissociation de la molécule H₂O sous l'effet du plasma. Dans un deuxième temps, les surfaces traitées par laser ont été produites dans l'eau ; les surfaces ainsi traitées contiennent les sous-oxydes Ti₂O₃ et TiO, ainsi que des traces du rutile TiO₂, tandis que le traitement dans l'air produit une couche externe riche en anatase TiO₂. La dispersion dans l'eau des particules de TiO₂, formées dans le plasma, a été proposée comme explication de cette différence du comportement.

L'adsorption et la désorption d'un gaz sur une surface mettent en jeu des propriétés thermodynamiques. **Jean-Marc Simon** nous en donne un aperçu avec l'étude de **l'adsorption du dihydrogène sur graphite**. C'est un point clé, parfois bloquant, dans l'utilisation de technologie de stockage d'hydrogène par adsorption. Ce processus élémentaire, appliqué à l'adsorption sur une membrane de graphite, est simulé en se basant sur un modèle de dynamique qui n'obéit pas à celle de Langmuir mais qui provient de simulations moléculaires. Le calcul des isothermes d'adsorption, la quantité de molécules adsorbées en fonction de la pression du gaz, dans les conditions de pression étudiées, montrent qu'à des températures inférieures à 170 K les isothermes obéissent à la loi de Langmuir pour laquelle l'interaction entre particules adsorbées ne peut pas être négligée. Au-delà de 170 K la densité de molécules adsorbées est faible et les molécules interagissent peu entre elles, cette

isotherme est régie par la loi idéale de Henry. Les cinétiques d'adsorption et de désorption ont été étudiées dans les deux régions et les résultats montrent une asymétrie entre adsorption et désorption (plus longue) qui peut être associée à des effets de non-idéalité de la phase adsorbée.

Un dernier volet est abordé dans l'ouvrage, celui de **l'apprentissage de la thermodynamique**. Les enseignants savent qu'il est difficile de l'enseigner et les étudiants souffrent à l'apprendre. Elle leur apparaît comme une matière confuse, d'intérêt purement technologique ; la nature de l'entropie est souvent mal saisie, quant à l'irréversibilité... Les ouvrages de Thermodynamique apparaissent en général aux étudiants comme rébarbatifs et leur fréquentation pénible. C'est vrai que des notions comme l'enthalpie et surtout l'entropie sans parler d'autres fonctions thermodynamiques paraissent encore moins fréquentables, peuvent sembler mystérieuses, théoriques voire ésotériques, en tout cas en dehors du monde pratique. Avez-vous déjà vu un " entropie-mètre " ? Non ! Alors ? L'usage très important de l'écriture mathématique, indispensable dans la plupart des cas, effraie aussi quelque peu le lecteur potentiel de ces ouvrages ! En son temps l'ouvrage de Sadi Carnot a connu les mêmes critiques que la notice nécrologique [31] rédigée par Adolphe Gondinet secrétaire de l'Association Polytechnique, à laquelle participait Sadi Carnot, résume bien dans le Compte-rendu trimestriel de janvier 1833 : « *Ce travail trop peu connu... aurait peut-être été d'une utilité plus générale si l'auteur lui eût donné la forme ordinaire des écrits scientifiques de l'époque. Négligeant presque entièrement le secours de l'analyse, il semble avoir pris à tâche de n'employer que les ressources ordinaires du raisonnement et ses démonstrations difficiles à suivre ont peut-être rebuté bien des lecteurs habitués aux formes simples et élémentaires qu'a revêtues la science moderne* ». Clapeyron lui-même avait noté [4] que « *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 générale, que je vais chercher à établir* ».

Trois textes s'aventurent dans cette thématique avec des approches très différentes. **Christien Jallut**, professeur à l'université Claude Bernard-Lyon1 prend la piste « **enseigner et pratiquer la Thermodynamique en Génie des Procédés** » en suivant la proposition de Gianni Astarita dans son ouvrage "*Thermodynamics. An advanced textbook for chemical engineers*" [32]: « *Thermodynamics, like any other branch of engineering science, is really made up of three parts: fundamental laws, constitutive equations and engineering applications* ». Après une rapide présentation du Génie des Procédés, le texte de C. Jallut est organisé selon ces trois chapitres, la Thermodynamique des systèmes, les propriétés thermodynamiques de la matière et l'Ingénierie thermodynamique.

Christophe Finot, professeur à l'université Bourgogne-Europe est dans une démarche différente destinée à un autre public avec « **enseigner l'énergie et ses multiples facettes aux étudiants de licence se destinant aux métiers de l'enseignement** ». Dans un processus de rénovation de l'enseignement de physique est introduit en dernière année du cycle licence de Physique Chimie un module de 20 h ayant entre autres l'objectif de replacer le thème de l'énergie dans un paysage sociétal plus large et notamment celui du développement durable. Une mise en perspective des aspects historiques, économiques, stratégiques est ainsi introduite pour mieux souligner la complexité de ce sujet particulièrement d'actualité. L'apport des savants bourguignons trouve alors une place toute particulière. Est-ce que l'espoir que les étudiants aiguisent leur curiosité et poursuivent par eux-mêmes leur formation avec toutes les ressources disponibles sera au rendez-vous ? A vérifier.

Le troisième texte est le fruit du hasard. Bertrand Delamotte, physicien au LPTMC à Paris, a donné une réponse à l'appel à communications que nous avons lancé qui a fait tilt « *Je vous signale que j'ai traduit en français la BD "L'entropie fatale" [33] pour les Editions du CNRS ...où Carnot a bien entendu toute la place qui lui revient* ». Nous aurions souhaité sa venue pour nous en parler mais ce ne fut pas possible. Alors nous avons choisi d'en parler quand-même et d'y consacrer une séquence du colloque. En effet les nombreux commentaires de lecteurs laissaient une impression de découverte ludique heureuse (enfin !) de la thermodynamique... Nous sommes plusieurs à l'avoir lu et l'article restitue deux regards, celui des 3 scientifiques de l'ICB, **Gilles Bertrand, Florence Baras et Vincent Boudon** qui ont décortiqué le contenu et celui de l'auteur de BD scientifiques **Thibault Roy** (et de sa fille) qui nous livre son ressenti. « *L'entropie fatale* » a réussi à se placer sous une forme inédite et

ludique au cœur des problématiques posées par la thermodynamique aujourd'hui. Merci à *CNRSEditions* d'avoir autorisé la copie de 4 pages où jouent nos scientifiques référents ; Merci à Max le démon de nous avoir offert ce temps particulier ! Apprendre la thermodynamique par le BD, une bonne idée ?

6) Dans sa conclusion **Stéphane Guérin**, directeur du laboratoire ICB, reprend les différentes thématiques abordées dans l'ouvrage en se demandant si Sadi Carnot était ingénieur, physicien, chimiste ou mathématicien. Son sujet relève manifestement de l'ingénierie mais sa façon de le traiter est typique d'une démarche de physicien, formuler un modèle dans ses éléments les plus fondamentaux et « simples » qui contiennent tous les ingrédients essentiels, mais pas plus, pour ensuite proposer une analyse puis des concepts permettant d'établir des lois générales. Toutefois, sa formation d'ingénieur et sa bonne connaissance sur les machines lui ont justement permis d'en identifier et extraire les éléments essentiels. Son ouvrage sans formules ne peut donc pas être considéré comme un texte mathématique au sens moderne. Cependant la formulation conceptuelle et le développement avec une logique précise et rigoureuse montrent une pensée authentiquement mathématique. Il en résulte les fondements de ce qui deviendra 20 ans plus tard la *thermodynamique*, discipline devenue majeure aussi bien en physique qu'en chimie. Stéphane Guérin en conclut que Sadi Carnot doit être considéré comme à la fois ingénieur, physicien, chimiste et mathématicien. L'influence thématique dans chacune de ces disciplines, et plus généralement interdisciplinaire, de l'ouvrage de Sadi Carnot jusqu'à nos jours a été essentiel. Cet aspect interdisciplinaire prend une place grandissante dans la science actuelle, elle a été en particulier centrale dans la constitution du laboratoire ICB et de ses multiples projets scientifiques. Stéphane Guérin rappelle que ce colloque a été accompagné par une conférence internationale intitulée « Quantum Carnot » organisée par le laboratoire ICB à Dijon (25-27 novembre 2024) avec des invités de prestige sur la thermodynamique quantique. Cette thématique qui a pris son essor dans les années 2000 vise à étendre la thermodynamique à des systèmes quantiques menant à de multiples applications. Il conclut que cette thématique prend toute son importance en cette année 2025, proclamée par l'ONU année des sciences et des technologies quantiques, démontrant une nouvelle fois le caractère actuel et disruptif de l'œuvre de Sadi Carnot.

Mais... comment Sadi Carnot conclut-il son ouvrage ? Il écrit pp. 117 et 118 : « *On ne doit pas se flatter de mettre jamais à profit, dans la pratique, toute la puissance motrice des combustibles. Les tentatives que l'on ferait pour approcher de ce résultat seraient même plus nuisibles qu'utiles, si elles faisaient négliger d'autres considérations importantes. L'économie du combustible n'est qu'une des conditions à remplir par les machines à feu ; dans beaucoup de circonstances, elle n'est que secondaire : elle doit souvent céder le pas à la sûreté, à la solidité, à la durée de la machine, au peu de place qu'il faut lui faire occuper, au peu de frais de son établissement, etc. Savoir apprécier, dans chaque cas, à leur juste valeur, les considérations de convenance et d'économie qui peuvent se présenter ; savoir discerner les plus importantes de celles qui sont seulement accessoires, les balancer toutes convenablement entre elles, afin de parvenir, par les moyens les plus faciles, au meilleur résultat, tel doit être le principal talent de l'homme appelé à diriger, à coordonner entre eux les travaux de ses semblables, à les faire concourir vers un but utile de quelque genre qu'il soit.* » et suit le mot FIN. Ce texte est un peu inattendu, il ouvre sur des perspectives sociétales que le corps du récit, purement scientifique et technique n'aborde pas. Il parle de prudence, d'économie, de sûreté, de solidité, de place disponible, de convenance et du talent d'arbitrage du dirigeant. C'étaient les conditions incontournables d'acceptabilité de ces nouvelles machines... On y ajouterait aujourd'hui les contraintes environnementales car c'est bien aussi un programme pour aujourd'hui dans le contexte scientifique, technologique, sociétal et planétaire que nous connaissons... Savoir apprécier à leur juste valeur, savoir discerner, coordonner les travaux, parvenir au meilleur résultat, concourir à un but utile.

Sadi Carnot a été un des savants, qui ont fait émerger un nouveau paradigme pour le futur de l'humanité. On peut penser qu'il se situerait à nouveau à cette hauteur dans la réflexion.



Figure 2. Médaille émise par l'atelier de la Monnaie de Paris, 1978, graveur Sylvain Bret. 1) avers : (Nicolas Léonard) Sadi Carnot selon un portrait de André Despoix de juin 1830 2) revers : Certains rayons du Feu (Soleil) se terminent en formules thermodynamiques.

Tableau repères chronologiques

• 1784 Lazare Carnot	Lettre sur les aérostats	• 1956 Zoran Rant	l'exergie
• 1824 Sadi Carnot	Réflexions sur la puissance motrice du feu	• 1956 Norman Ramsey	Température absolue négative (lasers)
• 1834 Emile Clapeyron	Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur	• 1959 Henry ED Scovil, Erich O Schulz-Dubois	la thermodynamique quantique
• 1848 William Thomson	échelle absolue de température	• 1959 Léon Brillouin	Vie, Matière et Observation
• 1849 William Thomson	naissance du mot « thermo-dynamic »	• 1965 Norman J. Zabusky, Martin D. Kruskal	les solitons
• 1850 Rudolf Clausius	les deux principes de la thermodynamique	• 1966-67 Ilya Prigogine	Thermodynamique loin de l'équilibre, les structures dissipatives
• 1865 Rudolf Clausius	l'entropie	• 1967 Nail Akhmediev Adrian Ankiewicz	concept de soliton dissipatif
• 1866 Augustin Mouchot	le moteur solaire	• 1972 Donella Meadows Dennis Meadows Jörgen Randers William W. Behrens	rapport Meadows <i>The Limit to Growth</i>
• 1878 Willard Gibbs	On the equilibrium of heterogeneous substances/ énergie de Gibbs	• 1977 Ilya Prigogine	Prix Nobel
• 1924 Fritz Maguerre	Les batteries de Carnot (André Thess 2018)	• 2004 Jien-Wei Yeh	High entropy alloys HEA

Références bibliographiques

- [1] BERTRAND Gilles (dir), *Chaleur, énergie, thermodynamique : le message de Carnot aujourd'hui...200 ans après*. Dijon ; Editions universitaires de Dijon. 2025. 290 p.
- [2] CARNOT Sadi, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris ; Bachelier libraire. 1824 (réédition Jacques Gabay 2005) voir aussi Gallica BNF édition numérisée- Annales scientifiques de l'E.N.S. 2e série, tome 1 (1872), p. 393-457 - Gauthier-Villars 1872. En anglais *Reflections on the Motive Power of Heat and on Machines Fitted to Develop that Power* Translated by Thurston Henry. New York: J. Wiley & Sons. 1890.
- [3] GIRARD Pierre Simon, Bulletins bibliographiques, livres français n°170, *Revue encyclopédique*, t.XXIII, p.411-414.
- [4] CLAPEYRON Émile, *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur*. Journal de l'Ecole Polytechnique, t.XIV, p.153-190. 1834. (réédition Jacques Gabay 2006) voir aussi gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France
- [5] THOMSON William, On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat and calculated from Regnault's observations, *Philosophical magazine*, vol. 33, p.100-106, 1848.
- [6] THOMSON William, 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. 541-574. 1849.
- [7] CLAUSIUS Rudolf, Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen, *Annalen der Physik und Chemie*, LXXIX, 368-397, 1850
- [8] CLAUSIUS Rudolf, Über verschiedene für die Anwendungen bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie, *Annalen der Physik und Chemie*, CXXV, 353-400, 1865. On trouve une version française dans *Journal de Mathématiques pures et appliquées* 2^{ème} série t.10, p.351-400, 1865

- [9] PICARD Emile, Notice historique sur la vie et l'œuvre de Lord Kelvin, associé étranger de l'Académie *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* t.169, p.1352-1919
- [10] HENRI Gilles, la thermodynamique, d'une simple question d'ingénieurs à la compréhension de l'irréversibilité. *Encyclopédie de l'énergie* 9 septembre 2021
- [11] CHEVRIER Joël, *Un physicien au musée*, éditeur L'ArtDit 2023
- [12] voir site CNRS Physique *La thermodynamique, 100% quantique* 13 juin 2023
- [13] ELOUARD Cyril et LOMBARD LATUNE Camille, Extending the Laws of Thermodynamics for Arbitrary Autonomous Quantum Systems, *PRX Quantum* 4, 020309 (2023).
- [14] GOLDBETER Albert, *La vie oscillatoire, Au cœur des rythmes du vivant*, Odile Jacob, Paris, 2018
- [15] BRILLOUIN Léon, *Vie, Matière et Observation*, Albin Michel, Paris, 1959.
- [16] NICOLIS Grégoire et PRIGOGINE Ilya, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. Wiley, New York, 1977
- [17] MATHIEU Caroline et SCHNEIDER Dominique (dir), Les Schneider, Le Creusot - une famille, une entreprise, une ville (1836 -1960), Fayard 1995 / MUNGO Giuseppe, La ville à l'odeur d'acier- Le Creusot (Dynastie Schneider), L'Harmattan 2022
- [18] RIGAL Emmanuel, Compression isostatique à chaud, *Techniques de l'ingénieur*, réf. M3310v1 2020
- [19] SUCHET Daniel et JOHNSON Erick *L'énergie solaire photovoltaïque* 2023
- [20] CAILLE Frédéric, *En finir avec les énergies fossiles. Les leçons solaires d'Augustin Mouchot, le Semurois universel*. Bulletin de la Société des sciences historiques et naturelles de Semur-en-Auxois et des fouilles d'Alésia, CXXX, pp.83-98. 2022, halshs-04082005
- [21] RANT Zoran, *Exergie, ein neues Wort für Technische Arbeitsfähigkeit (Exergy, a New Word for Technical Available Work)*. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 22, 36–37. (1956).
- [22] BOREL Lucien et FAVRAT Daniel, *Thermodynamique et énergétique - 1 - De l'énergie à l'exergie* (4^{ème} édition) PPUR Lausanne 2005
- [23] THESS André, chairman, *International Workshop on Carnot Batteries, Stuttgart, Germany, October 9-10, 2018*
- [24] TURING Alan Mathison, The Chemical Basis of Morphogenesis , *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol.237, 1952, p.37-72 (DOI 10.1098/rstb.1952.0012)
- [25] BALIAN Roger, Une température absolue peut-elle être négative ? *Pour la Science* n°425 p.27 février 2013
- [26] RAMSEY Norman F. Thermodynamics and Statistical Mechanics at Negative Absolute Temperatures, *Physical Review*. 103 (1): 2028. 1956, DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.20>
- [27] KONDEPUDI Dilip, *Introduction to Modern Thermodynamics*, Wiley (2008).
- [28] Cité de l'espace Toulouse, actualités spatiales, *Rosetta des ingrédients de la vie sur la comète 67P*, 6 juin 2016
- [29] YE H. J.-W., CHEN S.-K., LIN S.-J. et GAN J.-Y. , Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes , *Advanced Engineering Materials*, vol. 6, n° 5, mai 2004, p. 299–303 , DOI 10.1002/adem.200300567,
- [30] LAURENT-BROCQ Mathilde, COUZINIÉ Jean-Philippe, Alliages multi-composants à haute entropie - Concepts, microstructures et propriétés mécaniques *Techniques de l'Ingénieur* Réf : RE269 v1 2020
- [31] GONDINET Adolphe, Nécrologie Sadi Carnot, *Compte rendu trimestriel Association polytechnique*, p.46-47 janvier 1833
- [32] ASTARITA Gianni, *Thermodynamics. An advanced textbook for chemical engineers*, Plenum Press, New-York, 1989.
- [33] AUERBACH Assa, (Auteur), CODOR Richard (Dessins), DELAMOTTE Bertrand (Traduction) : CNRS Editions, 2019