

Le Professeur Maxime Duminil est vice-président de l'Association Française du Froid. Il a enseigné dans diverses écoles d'ingénieurs et universités : l'IFFI (Institut Français du Froid Industriel et génie climatique) au CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers), l'ECP (Ecole Centrale des Arts et Manufactures de Paris), l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, l'Université Paris VI, l'Université de Technologie de Compiègne, établissements dans lesquels il a donné des cours sur la production du froid, les échanges thermiques, la cryogénie et la conservation des denrées végétales. Les travaux de recherche conduits par Maxime Duminil et ses élèves du CNAM ont porté sur les cycles frigorifiques, les systèmes de production de froid, les échanges thermiques et le comportement des compresseurs à piston.

Maxime Duminil est ancien vice-président de la Commission B1 de l'IIF ; il est également Membre d'honneur de l'IIF. Il est expert judiciaire honoraire près de la Cour d'Appel de Paris. Actuellement, Maxime Duminil exerce la fonction de président de la Commission Frigoporteurs de l'Association Française du Froid. En dehors de ses préoccupations scientifiques et techniques, Maxime Duminil a toujours manifesté beaucoup d'intérêt pour l'histoire du froid. Il a souvent échangé des idées sur ce point avec son ami Roger Thévenot qui fut Directeur de l'IIF de 1956 à 1971.

Les scientifiques qui ont donné leur nom aux Prix Jeunes Chercheurs de l'Institut International du Froid : brèves histoires de leurs vies. Partie I

par
Maxime Duminil
122 Boulevard de Lozère
92120 Palaiseau
France
Fax : +33 (0) 1 60 10 06 26

INTRODUCTION

En 1989 l'Institut International du Froid (IIF) décida de créer les **Prix Jeunes Chercheurs** pour récompenser des travaux originaux remarquables, présentés par des chercheurs encore au début de leur carrière, dans les divers domaines de compétence qui relèvent des commissions spécialisées de l'Institut. Six prix furent donc créés, auxquels on donna les noms de scientifiques et d'ingénieurs prestigieux qui s'étaient illustrés dans ces domaines. A l'occasion des Congrès Internationaux du Froid, on attribue ainsi, à ces jeunes chercheurs méritants, les prix suivants :

Prix Peter Kapitza, pour des travaux en cryophysique ;

Prix Carl von Linde, pour des travaux en cryogénie ;

Prix Sadi Carnot, pour des travaux en thermodynamique ainsi qu'en transfert de chaleur et de masse ;

Prix James Joule, pour des travaux sur les systèmes et machines pour la production du froid, le chauffage thermodynamique et la climatisation ;

Prix Alexis Carrel, pour des travaux en cryobiologie, cryomédecine, cryochirurgie et biotechnologies ;

Prix Clarence Birdseye, pour des travaux relatifs à la chaîne du froid et au traitement frigorifique des denrées.

Il a paru bon de rappeler brièvement, aux lecteurs du *Bulletin* de l'IIF ce que furent les carrières de ces éminents savants, « parrains » de nos « Prix Jeunes Chercheurs ». Nous les présentons, dans l'ordre qui figure ci-dessus, dans ce numéro et dans un autre ultérieur.

I. PETER KAPITZA (1894-1984)

Piotr Leodimovitch Kapitza (ou Kapitsa), ingénieur et physicien russe, est né en 1894 à Kronstadt, une île du golfe de Finlande au large de Saint-Pétersbourg où il fit ses études à l'Institut Polytechnique. Il enseigna ultérieurement le génie électrique dans cet établissement. En 1921, après la mort de sa première femme et de ses deux enfants, décédés de la grippe espagnole, Peter Kapitza quitta la Russie, devenue l'URSS, pour l'Université de Cambridge. Il travailla au Laboratoire Cavendish de Cambridge, d'abord comme assistant d'Ernest Rutherford¹ puis, en 1924, comme directeur adjoint des recherches sur le magnétisme. Il y réalisa des champs magnétiques pulsés intenses, dont un de 500 000 gauss (50

¹ Ernest Rutherford (1871-1937) - Prix Nobel de Chimie - 1908.

tesla) qui ne fut surpassé que 30 ans plus tard. Il étudia également certains effets de ces champs magnétiques intenses comme leur influence sur la résistance électrique des métaux. Il fut élu en 1929 à la Royal Society qui n'avait pas nommé de membre étranger depuis deux cents ans. En 1930 on construisit, toujours à Cambridge, le Laboratoire Mond qui lui était destiné.

Dès les années 30, Peter Kapitza s'intéressa aux très basses températures, la cryologie et la cryogénie comme l'on dit maintenant. En 1934 il réalisa à Cambridge un liquéfacteur d'hélium utilisant un détendeur mécanique à piston pour le prérefroidissement de l'hélium avant son admission dans l'échangeur précédent le robinet de détente du circuit Joule Thomson. L'appareil ne nécessitait donc pas l'usage d'un refroidisseur à hydrogène liquide et n'utilisait que de l'azote liquide. Cette nouveauté présentait un avantage considérable [1]. Le piston du détendeur ne pouvant être lubrifié, il ne comportait pas de segments mais des rainures circulaires permettant le centrage du piston dans le cylindre. Le jeu piston/cylindre devait être très réduit puisque, la machine fonctionnant au sein du vide d'isolement, la fuite d'hélium ne pouvait donc être que très faible. L'habileté de Peter Kapitza et du mécanicien avec lequel il travaillait à Cambridge leur a permis de faire fonctionner cette machine par ailleurs d'un emploi difficile².

De retour en URSS en 1934 pour une conférence scientifique, le Pouvoir lui interdit de quitter le pays. En 1935 il est nommé directeur de l'Institut des Problèmes Physiques de l'Académie des Sciences de l'URSS. En 1938 la revue Nature publia deux articles sur la viscosité de l'hélium liquide à basse température, l'un de Peter Kapitza (Moscou) et l'autre de Allen et Misener (Cambridge). A ce propos, Peter Kapitza introduisit la notion de « superfluidité de l'hélium liquide » pour les températures inférieures au « point lambda » (2,17 K). En 1939 il montra l'intérêt de l'utilisation des turbines de détente centrifuges qui équipent maintenant tous les liquéfacteurs modernes et réalisa un grand liquéfacteur d'air pour la production d'oxygène mettant en jeu ces turbines ainsi que des récupérateurs thermiques. Il fut, cette année là, reçu à l'Académie des Sciences de l'URSS. En 1940–1941 il effectua de très importantes expériences sur l'hélium superfluide relatives à la théorie des deux fluides de F. London et Tisza. [2], [3]. A la même époque, il mit en évidence la discontinuité de température qui apparaît entre une surface solide et l'hélium liquide superfluide qui est à son contact [2]. Cette « résistance de Kapitza » a fait, depuis, l'objet de très nombreuses études tant expérimentales que théoriques.

En dépit de ses succès dans ce domaine, les années de guerre virent Peter Kapitza s'éloigner de la cryologie. En 1946, refusant de travailler au développement d'armes nucléaires Peter Kapitza tomba en disgrâce jusqu'à la mort de Staline en 1954. Puis, en 1955, les autorités le placèrent à la tête du Programme des satellites soviétiques (1^{er} Spoutnik : 1957). Enfin, en 1963, il se tourna vers la fusion thermonucléaire contrôlée et étudia, notamment, l'échauffement du plasma par impulsion laser. Ses résultats furent publiés en 1969.

Le Prix Nobel lui fut attribué en 1978 en même temps qu'aux astrophysiciens A. A. Penzias et R. W. Wilson. Il mourut à Moscou, en 1984, trois mois avant son quatre-vingt-dixième anniversaire.

Sa carrière montre combien sa curiosité scientifique était vaste et multiple. A. Sakharov³ a dit de lui [4] « ...Il garda jusqu'à sa mort, en 1984, une pensée et une expression claires et originales. Discuter avec lui était un pur plaisir... ». Bien que personnalité scientifique haut placée, cet homme de caractère n'hésitait pas à s'opposer aux autorités quand il le jugeait nécessaire. On l'a déjà vu avec son refus de participer au programme d'armement nucléaire. En avril 1938 les académiciens L. D. Landau⁴ et V. A. Fok furent emprisonnés pour « activités contre-révolutionnaires ». Grâce à l'acharnement de Peter Kapitza auprès du pouvoir, ils furent libérés le 1^{er} mai 1939. Pour entreprendre une telle croisade, même si sa notoriété internationale était incontestable, P. L. Kapitza a dû faire montre, à cette époque, d'une audace certaine.

² Quelques caractéristiques du liquéfacteur d'hélium Kapitza : diamètre du piston 31 mm – course variable de 35 à 50 mm – pression d'alimentation du détendeur et du robinet de détente 30 bar – pression de sortie du détendeur 2,2 bar – production : 1,7 l/h d'hélium liquide – consommation d'azote liquide 2 l/h.

³ Andréï Sakharov (1921-1989), physicien russe.

⁴ Lev Davidovitch Landau (1908-1968), physicien-théoricien russe – Prix Nobel de Physique 1962.

II. CARL VON LINDE (1842-1934)

Carl von Linde, ingénieur, professeur et industriel allemand, est né en 1842 à Berndorf, en Franconie (Bavière). Il étudia quatre ans à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich où il fut l'élève de maîtres célèbres comme Clausius et Zeuner. Ils lui donnèrent ce goût pour la thermodynamique qui ne le quitta plus. Jeune ingénieur cherchant « sa voie », il travailla dans diverses industries, de 1864 à 1868, notamment dans la fabrique de locomotives de Munich. En 1868, il fut nommé chargé de cours de mécanique à la Technische Hochschule (Ecole Supérieure Technique) de Munich ouverte depuis peu. Il en devint, en 1872, professeur titulaire. Il occupa ce poste jusqu'en 1879. En 1873 il y organisa des conférences importantes sur la « théorie des machines à froid ».

En 1870, trois grands types de systèmes de production de froid étaient en concurrence :

- le système à compression de vapeurs liquéfiables, qui posait encore de nombreux problèmes de fiabilité et dont les frigorigènes étaient essentiellement les éthers éthylique et méthylique ;
- le système à absorption ammoniac/eau de Carré⁵ qui avait réussi une rapide entrée dans le monde industriel ;
- le système frigorifique à air qui se cherchait encore.

Dans son important mémoire sur « Les moyens mécaniques propres à extraire de la chaleur à basse température » Carl von Linde fit une exposition raisonnée de ces systèmes et entreprit une étude comparative de leurs efficacités relatives. Mais son choix fut vite fait et c'est vers les systèmes à compression qu'il se tourna pour la première partie de sa carrière industrielle. En 1873, au Congrès International des Brasseurs, à Vienne, Carl von Linde exposa les avantages du système frigorifique à compression. En 1875 il réalisa son premier compresseur frigorifique à l'éther méthylique dans lequel il avait incorporé des éléments techniques pour éviter les difficultés rencontrées par le français Charles Tellier.⁶ En 1876 il choisit « son » frigorigène : l'ammoniac. Il étudia alors, successivement, pour ce fluide : en 1876, un compresseur vertical bi-cylindrique et en 1877, un compresseur horizontal à double-effet. Ces appareils, furent d'abord construits par la « Maschinenfabrik » d'Augsburg (Bavière) puis, très vite, dans d'autres pays. Ce succès incita Carl von Linde à abandonner l'enseignement pour se consacrer intégralement à l'activité industrielle. Il créa donc en 1879, à Wiesbaden (Hesse), la « Gesellschaft für Linde Eismaschinen » (Société des Machines à Glace Linde), société qu'il dirigea jusqu'en 1890.

Entre-temps, la découverte du point critique par T. Andrews⁷ puis la liquéfaction, en laboratoire, de l'oxygène, en 1877, à Paris par L. P. Cailletet,⁸ puis à Genève par R. P. Pictet,⁹ avaient détruit l'illusion des « gaz permanents ». Les basses températures qu'on pouvait escompter produire en liquéfiant ces gaz difficiles, la possibilité de séparer les constituants de l'air par distillation fractionnée d'air liquéfié (idée émise par Ernest Solvay¹⁰ en 1886), incitèrent les ingénieurs à s'intéresser, en cette fin du 19^e siècle, à ce que nous appelons la cryogénie. Comme 1877 fut une année charnière pour la liquéfaction expérimentale de l'oxygène réalisée à peu près simultanément par L. P. Cailletet et R. P. Pictet, 1895 fut aussi une année charnière pour la liquéfaction industrielle de l'air, par les dépôts quasi-simultanés des brevets de W. Hampson¹¹ et de Carl von Linde et les expériences de ce dernier, point de départ de la seconde partie de sa carrière industrielle.

⁵ Ferdinand Carré (1824-1900), ingénieur français.

⁶ Charles, Louis, Abel Tellier (1828-1913), ingénieur français.

⁷ Thomas Andrews (1813-1885), médecin irlandais qui se tourna vers la recherche physique. En 1862 il décrit l'état critique du CO₂ et présenta en 1869 à la Royal Society son mémoire « On the Continuity of the Gaseous and Liquid States of Matter ».

⁸ Louis, Paul Cailletet (1832-1913), industriel et physicien français.

⁹ Raoul, Pierre Pictet (1846-1929), professeur et ingénieur suisse.

¹⁰ Ernest Solvay (1838-1922), chimiste et industriel belge.

¹¹ William Hampson (1854-1926), ingénieur anglais.

L'un comme l'autre de ces ingénieurs utilisèrent la très importante idée d'un « échangeur thermique de récupération », antérieurement proposé par W. Siemens,¹² en 1857, pour l'amélioration du cycle frigorifique à air de John Gorrie.¹³ Grâce à cet élément le froid produit est ainsi très soigneusement récupéré. Le 29 mai 1895, en faisant usage d'un tel échangeur et en détendant le gaz dans un simple robinet, (détente Joule-Thomson, sans travail extérieur), Carl von Linde a obtenu une production de 3 litres par heure d'air liquide ; il a alors déposé un brevet le 5 juin 1895 [5]. W. Hampson avait, quant à lui, déposé une « spécification provisoire », le 23 mai 1895, au Bureau des Brevets de Londres [6] pour un appareil voisin dont le mode de détente du gaz n'était pas explicité¹⁴ puisque l'auteur n'avait encore procédé à aucune expérience. Selon Georges Claude¹⁵ [7], W. Hampson a présenté son premier appareil en fonctionnement en avril 1896 chez « Brin's Oxygen Works » ; sa petite production le destinait à des laboratoires. La priorité de Carl von Linde est donc évidente. Carl von Linde réalisa ensuite, très vite, d'abord un système plus performant, à double détente sans travail extérieur puis un système encore amélioré avec pré-refroidissement de l'air sous pression au moyen d'une machine frigorifique à ammoniac. En 1899 il construisit sur ces bases, pour l'industrie chimique, [Usine de la Rhénania à Stolberg (Rhénanie-Westphalie)] une machine produisant 50 l/h d'air liquide. La liquéfaction de l'air entrainait réellement dans le monde industriel.

La séparation des constituants de l'air fut aussi pour Carl von Linde un grand sujet d'études et de recherches industrielles. Dès 1896 il réalisa un appareil d'enrichissement d'air en oxygène (jusqu'à 50 % d'oxygène) par vaporisation fractionnée.¹⁶ Mais pour bien des usages c'est de l'oxygène à peu près pur dont on avait besoin. Pour atteindre ce but Carl von Linde et son fils Friedrich réalisèrent alors, en 1902, un appareil à oxygène purifié par rectification [8]. Notons que le canadien Le Sueur avait été le premier, en 1900, à suggérer l'usage d'une telle rectification [9]. Enfin, dès 1907, C. von Linde introduisit le système à double colonne de rectification qui est encore en usage actuellement à quelques variantes près. A la suite de ces immenses avancées techniques les usines de liquéfaction et de séparation des constituants de l'air se développèrent rapidement, dès le début du 20^e siècle, dans les pays industrialisés.

Carl von Linde a été une des personnalités marquantes du 1^{er} Congrès International du Froid (Paris 1908) où furent jetées les bases de l'Association Internationale du Froid devenue depuis l'Institut International du Froid (IIF). Il fit partie du prestigieux Comité¹⁷ pour la gestion des fonds attribués, en 1912, par cet organisme au Centre de Cryologie de Leyde.

Ce grand personnage, dont les travaux furent d'une importance primordiale dans le froid industriel et la cryogénie, mourut à Munich en 1934. Comme l'écrit Roger Thévenot, notre regretté ancien Directeur de l'IIF [10] :

« Carl von Linde brilla à la fois comme homme de science, comme professeur, comme ingénieur et comme industriel, faisant preuve de qualités qu'on trouve rarement réunies chez le même homme. »

III. SADI CARNOT (1796-1832)

Sadi, Nicolas, Léonard Carnot, ingénieur et physicien français, est né en 1796 à Paris. Il était le fils aîné d'un homme célèbre, Lazare Carnot, ingénieur militaire de culture scientifique étendue et homme politique éminent. Surnommé pendant la Révolution Française « l'Organisateur de la Victoire », Lazare Carnot dut s'exiler à la fin du Premier Empire. Sadi Carnot fit ses études à l'Ecole Polytechnique, école militaire prestigieuse fondée en 1794, puis à l'Ecole du Génie et de l'Artillerie de Metz. Capitaine du Génie il vit, en 1819, sa carrière bloquée par la disgrâce de son père. Il obtint sa mise en disponibilité et fréquenta quelque temps les milieux artistiques, littéraires et scientifiques. Il suivit, à cette époque, les

¹² Wilhelm von Siemens (1823-1883), un des membres de cette illustre famille d'ingénieurs et d'industriels allemands. Il émigra en Angleterre en 1844 puis adopta la nationalité britannique en 1859. Anobli en 1883, pour ses importants travaux industriels, il devint Sir William Siemens.

¹³ John Gorrie (1803-1855), médecin américain d'origine écossaise, inventeur de la machine frigorifique à air (1844).

¹⁴ On indiquait simplement « mode usuel de détente », sans plus.

¹⁵ Georges Claude (1870-1950), ingénieur et industriel français, cofondateur, avec Paul Delorme et Frédéric Gallier de la société « l'Air Liquide ». Il fut, en 1902, le premier à utiliser la détente avec travail extérieur pour liquéfier l'air.

¹⁶ « L'air de Linde », comme on disait alors, fut utilisé dans l'industrie chimique notamment dans celle des explosifs.

¹⁷ A coté de Van der Waals (Président), de Dewar, Olszewski et Kammerlingh Onnes.

cours sur la chaleur de Clément-Desormes,¹⁸ professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers.¹⁹ Les nombreux contacts qu'il eut alors avec ce maître développèrent son intérêt pour l'étude des gaz et les machines thermiques [11].

Ses réflexions se concrétisèrent par la publication, en 1824, d'un ouvrage de 118 pages et 5 figures « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance » [12]. Ce très court traité a cependant été appelé à connaître, dans le monde savant, une immense célébrité.

Dès les premières pages l'ampleur des vues de Sadi Carnot se fait jour :

- **l'idée d'indépendance de la production mécanique vis-à-vis des fluides actifs ou de la technologie :**
« 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... » (page 8) ;
- **la nécessité de mettre en œuvre, au moins, deux sources de chaleur à températures différentes :**
« ... il ne suffit pas, pour donner naissance à la puissance motrice, de produire de la chaleur : il faut encore se procurer du froid ; sans lui la chaleur serait inutile... » (page 11) et aussi (page 16) « 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... ». N'est ce pas là, déjà, l'idée de la pompe à chaleur qui nous occupe aussi à l'IIF ? Sans nul doute ! Il reprend d'ailleurs cette idée page 19. Il faudra cependant attendre William Thomson²⁰ pour que le terme de « heat pump » soit utilisé ;
- l'idée de la puissance maximale que peuvent produire les machines thermiques : « D'après les notions établies jusqu'à présent, on peut comparer avec assez de justesse la puissance motrice de la chaleur à celle d'une chute d'eau : toutes deux ont un maximum que l'on ne peut pas dépasser... La puissance motrice d'une chute d'eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide ; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique²¹ employé et de ce qu'on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet la hauteur de sa chute, c'est à dire la différence de température des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique... » (page 28).

On trouve encore bien d'autres choses dans ce petit livre si important : des idées sur réversibilité et irréversibilité, même si ces termes n'apparaissent pas (pages 23 à 28), la description du célèbre cycle aux deux isothermes et deux adiabatiques²² (pages 32 à 35), son fameux théorème (page 38), etc. Les problèmes thermiques dans les gaz occupent aussi une large partie de la seconde moitié de l'ouvrage. Ainsi, page 59, Sadi Carnot énonce :

« La différence entre la chaleur spécifique sous pression constante et la chaleur spécifique sous volume constant est toujours la même, quelle que soit la densité du gaz pourvu que la quantité pondérale reste la même... »

C'est exactement ce que formulera, avec des précisions complémentaires, R. J. von Mayer²³ en 1842.

¹⁸ Nicolas Clément (1779-1842), chimiste et physicien français. Il épousa la fille de son confrère Charles-Bernard Desormes et associa son nom au sien, devenant ainsi Clément-Desormes. Les deux hommes travaillèrent sur de nombreux problèmes de chimie et sur la mesure du rapport des chaleurs spécifiques des gaz.

¹⁹ Musée et Etablissement d'Enseignement Supérieur Technique créé, lors de la Révolution Française, en 1794, par la Convention.

²⁰ William Thomson (1824-1907), physicien anglais, anobli en 1892 avec le titre de Lord Kelvin.

²¹ Au temps de Carnot la chaleur n'apparaissait pas encore comme une forme de l'énergie mais comme un fluide impondérable et indestructible : le calorique. Dans le conscient (ou l'inconscient) de Carnot cette image « fluidique » de la chaleur a été sans doute à la base de la fructueuse analogie qu'il développa entre les machines hydrauliques et thermique et de la seule inexactitude qu'on relève dans la page 10.

²² Ces termes ne sont pas, non plus, employés dans le livre.

²³ Robert, Julius von Mayer (1814-1878), thermodynamicien allemand.

L'ouvrage apparaît bien comme l'acte de naissance du « second principe de la thermodynamique, »²⁴ un des fondements de cette science et le premier des principes qui furent énoncés. Cependant, lors de sa publication, il passa à peu près inaperçu. Il fallut attendre 10 ans et E. Clapeyron²⁵ [13], [14] pour que, deux ans après sa mort, on rende enfin justice à l'œuvre de Sadi Carnot. C'est au travers des travaux de E. Clapeyron que R. J. E. Clausius²⁶ (en 1850) et Kelvin (en 1851) purent mesurer, en la précisant et en la complétant, l'importance de l'œuvre de Sadi Carnot.

Sadi Carnot démissionna de l'Armée en 1828. On ne connaît pas d'autre publication de lui et l'on sait très peu de choses sur son activité vers la fin de sa vie. Il mourut en août 1832 du choléra, un mal qui sévissait en France à cette époque. Son frère Hippolyte retrouva, après sa mort, de nombreuses notes qui nous apprennent qu'il abandonna la notion de calorique et reconnut que la chaleur est une forme de l'énergie. Dans ces mêmes notes il rectifia son erreur sur la non-consommation du calorique et donna même la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur, devançant ainsi R. J. von Mayer. Ces notes furent publiées, malheureusement bien tardivement, en 1878, par Hippolyte Carnot.

Il est incontestablement un des pères fondateurs de cette science aux mille facettes qu'est la thermodynamique.

BIBLIOGRAPHIE

Peter Kapitza

- [1] Kapitza P.L. – *Proc. of the Royal Society*. 1934; 147: page 189 et suivantes.
- [2] Kapitza P.L. – *J. Physics URSS*. 1941; 4:181.
- [3] Kapitza P.L. – *J. Physics URSS*. 1941; 5: 59.
- [4] Sakharov A.D. – *Mémoires* - Ed. du Seuil. 1990: 334.

Carl von Linde

- [5] Brevet allemand n° 88 824 du 5 juin 1895.
- [6] Brevet anglais spécification provisoire n° 10 165 du 23 mai 1895.
- [7] Claude G. Air Liquide – Oxygène – Azote – Gaz Rares - 2^e Ed. (1926) – Dunod Ed. – note de la page 82.
- [8] Brevet allemand n° 173620 du 27 février 1902.
- [9] Brevet canadien n° 74430.
- [10] Thévenot R. *Essai pour une histoire du froid artificiel dans le monde*. 1978. IIF. p. 478.

Sadi Carnot

- [11] *1820-1970, cent cinquante ans de Haut Enseignement Technique au Conservatoire National des Arts et Métiers*. 1970. Ed. Ministère de l'Education Nationale. p 83.
- [12] Carnot S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. L'ouvrage a été publié, en 1924, chez Bachelier, libraire à Paris. Il a été réimprimé en fac-similé, en 1990, par l'éditeur Jacques Gabay, à partir d'un original prêté par la bibliothèque du Conservatoire National des Arts et Métiers.
- [13] Clapeyron E. *Journal de l'Ecole Polytechnique*. 1834;18: 170.
- [14] Clapeyron E. *Poggendorffs Ann*. 1843; 59: 446.

²⁴ Encore désigné quelquefois comme « principe de Carnot ».

²⁵ Emile Clapeyron (1799-1864), physicien français.

²⁶ Rudolf, Julius, Emmanuel Clausius (1822-1888), thermodynamicien allemand. Il donna au second principe de la thermodynamique sa formulation classique et introduisit la fonction « entropie ».