

Chaudière mixte système Solignac — Extrait de la Revue scientifique et industrielle de l'année 1898-1899 de J.-L. Breton.

Thomas
S. Kuhn.

L'œuvre de Sadi-Carnot et la tradition de la science des ingénieurs (1959).

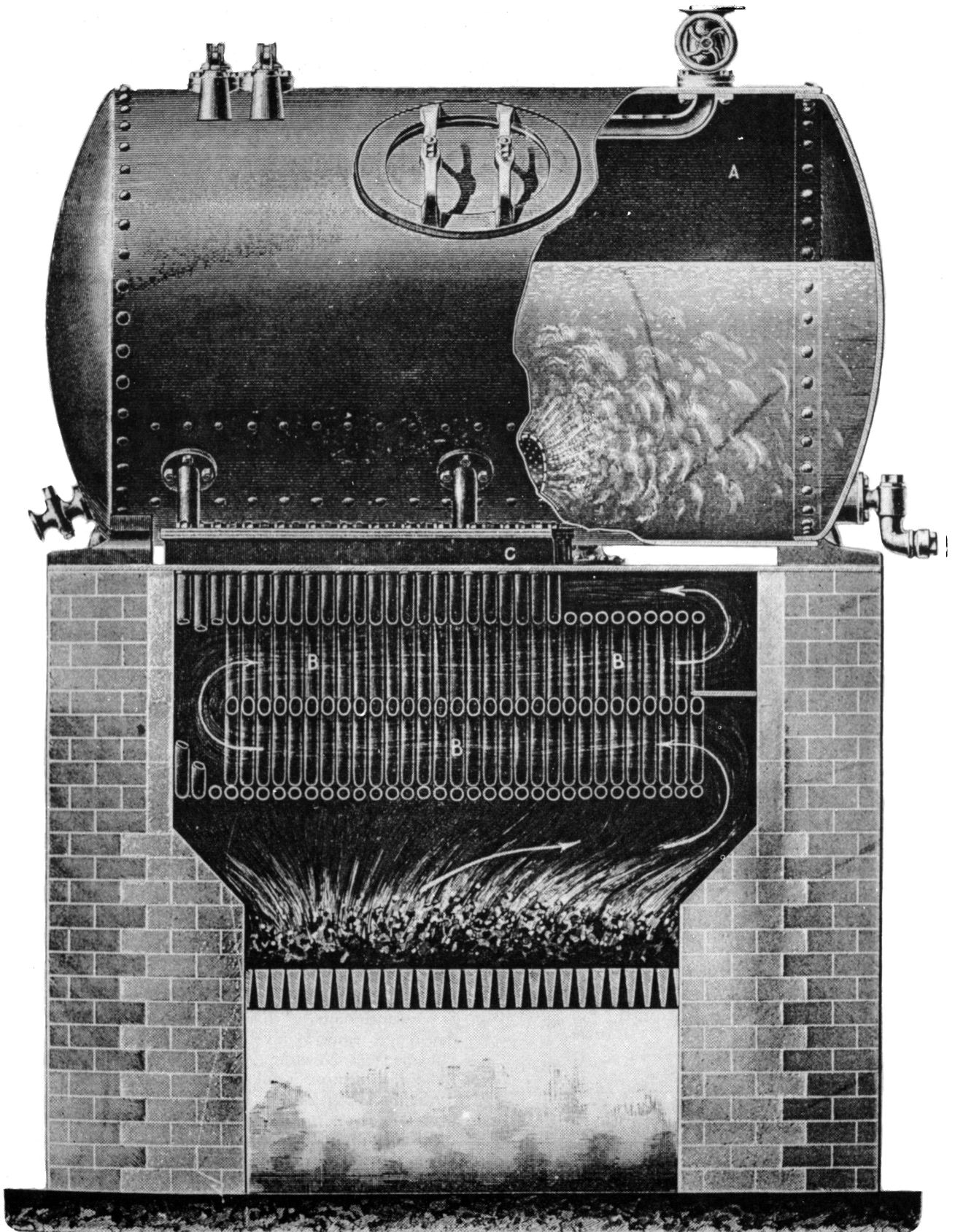
avec une note du
traducteur,
Jacques
Grinevald.



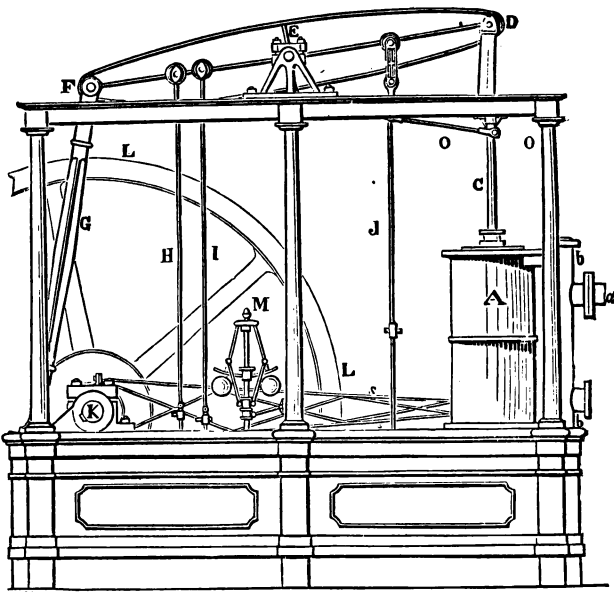
Sadi Carnot, 1837-1894.

Les contributions de Sadi Carnot à la physique théorique, si elles ne sont pas les plus fondamentales que l'historien connaisse, sont souvent apparues comme les plus proches du cas sans précédent. L'histoire normale de la physique ne rapporte personne qui ait joué pour Carnot le rôle de Hooke ou de Huyghens vis-à-vis de Newton, de Faraday ou de Kelvin vis-à-vis de Maxwell ou de Lorentz et des autres vis-à-vis de Einstein. Mon propre travail sur la thermodynamique commença aussi par m'engager dans la conception d'un «Carnot isolé» et je fus donc déconcerté de découvrir ensuite d'importants précédents pour sa recherche dans la littérature du début du XIX^e siècle sur la compression adiabatique¹. Depuis cette époque, j'en suis arrivé à voir que même mon problème était mal posé. Le XVIII^e siècle avait vu une séparation croissante, bien que jamais complète, entre la littérature de la physique théorique et celle de la science des ingénieurs*. C'est à cette dernière tradition qu'appartenait essentiellement la formation de Carnot. Autrement dit, celui qui cherche des précédents pour son œuvre dans la science des ingénieurs plutôt que dans la physique à laquelle il fit sa principale contribution peut, en effet, trouver d'importantes relations entre ses *Reflexions* et l'active tradition de recherche de son temps².

Ce qui suit est un compte rendu très condensé et donc trop dogmatique d'une première recherche à travers la littérature du XVIII^e siècle et du début du XIX^e sur la production de la puissance motrice*. Il s'agit d'un corpus dont l'origine est davantage associée avec Amontons et Parent qu'avec Huyghens et Newton, et dont les héros du XVIII^e sont Bélidor, Smeaton, Coulomb et Carnot *père* plutôt que d'Alembert, Lagrange ou Laplace. Bien que les auteurs de la première de ces traditions employèrent souvent des théorèmes développés par ceux de la seconde, ils les développèrent d'habitude différemment pour les appliquer à des problèmes différents. Daniel Bernoulli et Euler, tous deux Suisses, font partie des quelques savants du XVIII^e siècle qui apportèrent des contributions originales au développement à la fois de la tradition mathématique (abstraite) et de la tradition de la «science des ingénieurs³».



Chaudière mixte système Solignac. — Type B à faisceau tubulaire en S. — Vue arrière et coupe transversale.



Machine de Watt.

De la tradition de la science des ingénieurs à laquelle il fut formé, qu'a-t-il alors pu apprendre? Je suggère tout d'abord qu'elle lui fournit son problème et ses termes. De «Sur la plus grande satisfaction possible des machines» de Parent (1704), en passant par les «Recherches expérimentales sur l'eau et le vent considérés comme forces motrices» de Smeaton (1759), à la «Théorie des machines simples» (1781) de Coulomb, la principale préoccupation des auteurs de cette tradition reste la même — découvrir par l'application de l'expérience et de la théorie physique existante comment obtenir l'effet mécanique maximum d'une dépense donnée de force motrice. Le même problème fournit un thème unificateur prédominant pour les travaux généralement postérieurs de Borda, Bossut, Carnot père, Prony, Navier et Hachette, un groupe étroitement lié dont les membres comprennent un fondateur de l'*Ecole polytechnique* et deux hommes qui y enseignèrent à l'époque où Carnot y était élève. De tels hommes, Carnot apprit les questions qu'il allait poser plus tard à propos des machines thermiques et il acquit en même temps certains concepts nécessaires à la solution de son problème. En particulier, il acquit le concept quantitatif d'effet mécanique ou travail, une mesure manifestement absente des écrits d'hommes comme Lagrange, Laplace et Poisson, mais qui revient dans tous ceux des auteurs de la science des ingénieurs cités plus haut⁴.

Nous ne devons pas, cependant, nous limiter nous-mêmes à de tels aspects généraux de la tradition de l'ingénierie. Il y a aussi des théorèmes concrets de la science des ingénieurs qui trouvent d'étroits parallèles avec les éléments du mémoire de Carnot. Permettez-moi d'en citer deux, tous deux tirés de l'*Essai sur les machines en général* de Lazare Carnot. Le premier, largement cité dans la littérature ultérieure sur la science des machines en tant que «théorème de Carnot», établit que: «Pour faire produire aux Machines le plus grand effet possible, il faut qu'il n'y ait aucune percussion, c'est-à-dire qu'elles ne changent jamais de mouvement que par degrés insensibles⁵.» Cette proposition, que ce soit par hasard ou par influence, est conceptuellement parallèle au théorème de Carnot sur le rendement maximum des machines thermiques. Ce théorème établit que, pour l'effet maximum, il

faut qu'il n'y ait aucune discontinuité de température, qu'un corps chaud ne doit pas être mis en contact avec un plus froid ou, pour utiliser les propres termes de jeune Carnot, «*Dans le corps employé pour le développement de la puissance motrice, il ne doit y avoir aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume*⁶.» Ce n'est pas le seul point auquel le jeune Carnot peut faire écho au vieux. L'ouvrage de ce dernier souligne aussi qu'avant de calculer l'effet mécanique des machines entraînées par des ressorts (à cette époque on considérait souvent le gaz ou la vapeur renfermée comme un ressort) il faut toujours que la machine soit revenue à sa position initiale⁷. Mais l'insistance de Sadi Carnot à traiter un cycle moteur complet, plutôt que la seule course motrice, est une différence capitale entre son œuvre et celle de tous les premiers ingénieurs de la *vapeur*.

Cette différence ne signifie cependant pas que Carnot n'a rien appris des anciens auteurs sur les machines à vapeur, et je conclurai en notant ce qu'il a pu trouver dans leurs travaux. Au moins depuis l'*Hydrodynamique* de 1771 de Bossut, un livre qui contient une théorie fragmentaire mais quantitative de la machine de Newcomen, un grand nombre de ces traités d'ingénieur enseignaient comment calculer le travail effectué par cycle comme le produit de la section transversale du cylindre, de la course et de la pression différentielle⁸. Les comptes rendus les plus rigoureux et les plus développés se trouvent dans la *Nouvelle Architecture hydraulique* (1790-96) de Prony et le *Traité élémentaire des machines* (1811) d'Hachette, le premier étant cité par Carnot et le second faisant partie de ses manuels à *Polytechnique*⁹. Ces deux livres indiquent aussi l'idéalisation propre aux calculs de la machine à vapeur. Dans la deuxième édition d'Hachette, de 1819, l'abstraction est explicite: «La partie essentielle d'une machine à vapeur et la seule qu'il soit nécessaire de considérer pour connaître l'effet mécanique de la vapeur est constituée d'un cylindre calibré, d'un piston avec sa tige et de deux soupapes¹⁰.» Carnot ignore la tige et, pour des raisons que je discuterai tout à l'heure, il néglige les soupapes. Pour le reste, son idéalisation est la même. Enfin, ces deux ouvrages enseignent comment *calculer* non seulement l'effet croissant dû à l'augmentation de la température de la chaudière mais encore, ce qui est plus significatif, celui qui est dû à l'abaissement de la température du condenseur¹¹. En bref, ils mettent en évidence l'importance du *puits thermique*^{*} aussi bien que de la source de chaleur, deux éléments qui complètent la liste des composantes de la machine de Carnot.

Dans tous les livres mentionnés ci-dessus, excepté la deuxième édition d'Hachette, le calcul de l'effet mécanique suppose constante la pression de la vapeur d'un bout à l'autre de la course. Mais à la fois la version révisée d'Hachette et le brevet de Watt pour l'emploi de la force expansive de la vapeur, largement diffusé, enseignaient comment calculer le travail par cycle lorsque cela n'était pas le cas¹². Et le second de ces textes — la patente de Watt que Carnot discute longuement — faisait bien plus. A la fois dans une table et dans un diagramme, Watt distinguait nettement la première partie d'une course durant laquelle le cylindre est en communication avec la chaudière et la pression de la vapeur constante, de la seconde partie durant laquelle la chaudière est coupée et la pression de la vapeur tombe avec la course. Ces étapes, cependant, ressemblent très étroitement aux deux premières phases du cycle de Carnot et elles peuvent, par conséquent, constituer le plus important de tous les précédents techniques mentionnés ici. Le brevet de Watt n'indique pas que la température de la vapeur tombe avec la pression dans la machine utilisant la détente, mais en 1819 le *Traité* d'Hachette rendait ce point explicite¹³. Si Carnot ne l'a pas appris là, il aurait appris à la fois l'effet adiabatique et les moyens de le calculer des travaux sur la compression adiabatique cités dans son mémoire¹⁴.

Ces éléments, tous, sauf le dernier, tirés de la littérature technique, sont les plus évidents des outils avec lesquels Carnot aborda sa recherche d'une théorie générale des machines thermiques. Toutefois, il peut y avoir un autre rapport significatif auquel Carnot est redevable au corpus des travaux précédents dans le domaine de la science des machines. Le seul problème concret que Carnot se posa au début de son mémoire était une comparaison de l'efficacité des diverses substances mises en œuvre dont l'expansion thermique peut fournir du travail mécanique. Comme Carnot le notait, ce problème était tiré de la littérature contemporaine sur la science des machines, bien que l'air, comme substance à mettre en œuvre, était la seule alternative qui recevait beaucoup d'attention. Le manuel de *Polytechnique* utilisé par Carnot décrit deux machines à air et sa deuxième édition parle de travaux sur deux autres¹⁵. Vraisemblablement, Carnot avait surtout à l'esprit les machines de ce genre. Deux aspects de son mémoire semblent certainement refléter cette préoccupation de la technologie française de l'époque.

En premier lieu, la machine de Carnot, dans la mesure où il la traite clairement et rigoureusement, est une machine à air ou à gaz idéale et pas du tout une machine à vapeur. La seule tentative de Carnot de discuter un cycle de vapeur idéal et préliminaire, maladroite et erronée¹⁶. L'idéalisation de Carnot a bien plus vraisemblablement été suggérée par l'étude de la machine à air que par l'étude des machines mues par la vapeur. Dans les machines à air, comme celle de Carnot, le réchauffage s'opérait ordinairement à l'intérieur du cylindre plutôt que d'une manière externe. Et dans l'un de ces moteurs, inventé par Cagnard de Latour, le réchauffage s'opérait sans rien prendre d'autre que de la chaleur au réservoir à haute température. A d'autres égards aussi le moteur à air illustre mieux que toute autre machine à vapeur les traits essentiels de l'abstraction de Carnot. Mais le raisonnement nécessaire pour établir ce point est complexe et je suis obligé de le réserver pour une autre occasion¹⁷. Même sans cela, nous pouvons voir que la fulgurante contribution de Carnot à la physique était le produit de l'esprit d'un ingénieur.

Source : Thomas S. Kuhn, «Engineering Precedent For the Work of Sadi Carnot», *Archives internationales d'histoire des sciences*, 1960, 13, pp. 251-255. (Texte également publié dans les Actes du IX^e Congrès international d'histoire des sciences (Barcelone-Madrid, 1959), Barcelone, Paris, 1960, pp. 530-535.)

* Sur la traduction du terme «engineering» utilisé par l'auteur, voir, à la suite de ce texte, la Note du traducteur.

Traduction de Jacques Grinevald.

* Voir la Note du traducteur.

* En anglais, «Heat sink», expression moderne qui traduit le «réfrigérant» de Carnot, la source froide (N.d.T.).

Notes.

1. Pour ma première intervention, voir [«Carnot's Version of "Carnot's Cycle"»], *American Journal of Physics*, 1955, 23, pp. 91-95, n° 15. Sur la compression adiabatique, voir [«The Caloric Theory of Adiabatic Compression»], *Isis*, 1958, 49, pp. 132-140. La connaissance par Carnot de cet ensemble de travaux est illustrée par la note 14 ci-dessous.

2. On a souvent déclaré que les contributions de Carnot à la physique étaient un dérivé de son intérêt pour les problèmes pratiques de l'ingénierie, mais je pense que personne ne s'est jusqu'ici demandé quels précédents technologiques cet intérêt lui fournit.

3. Les strictes limitations d'espace imposées aux participants du IX^e Congrès international d'histoire des sciences, pour lequel ce texte fut originellement préparé, m'oblige à ignorer le problème complexe de la différenciation des traditions européennes de l'ingénierie et de la science abstraite. Bien entendu, il n'y a aucune division nette, mais la division qu'il y a demande une discussion plus complète que j'entreprendrai ailleurs. Les restrictions d'espace me forcent également à omettre les références, excepté là où leur absence pourrait conduire au malentendu ou rendre mes arguments spécialement difficiles à vérifier.

4. Ce point exige une discussion à part, mais certaines indications en sont données dans mon texte sur la conservation de l'énergie [«Conservation of Energy as an Example of Simultaneous Discovery»] in Marshall Claggett, ed., *Critical Problems in the History of Science*, Madison, University of Wisconsin Press, 1959, pp. 321-356, particulièrement les notes 40, 41, 46, et le texte en rapport. A noter aussi que la *Mécanique philosophique* (Paris, 1810) de De Prony, étant basée sur Lagrange et Laplace, ne mentionne aucune mesure de l'effet mécanique, bien que de Prony soit l'inventeur d'un dynamomètre et que l'effet mécanique soit la mesure la plus constamment employée dans son précédent ouvrage d'ingénierie, *Nouvelle Architecture hydraulique* (Paris, 1790-96).

5. Le titre ci-dessus est celui de la première édition de L.N.M. Carnot (Dijon, 1782). Je cite à partir de la seconde édition beaucoup plus connue, *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement* (Paris, 1803), p. 21.

6. Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Paris, 1824), réimpression en fac-similé (Paris, Blanchard, 1953), p. 23. Les italiques sont de Carnot.

Je trouve ce parallèle entre les deux Carnot également noté par F.O. Koenig qui le discute dans sa contribution [«On the History of Science and of the Second Law of Thermodynamics»] à H.M. Evans, ed., *Men and Moments in the History of Science*, Seattle, Washington, University of Washington Press, 1959, pp. 57-111, particulièrement p. 89.

7. L. Carnot, *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, op. cit. p. 262. Pour l'assimilation des gaz aux ressorts, voir A. Guényveau, *Essai sur la science des machines* (Lyon, 1810), chap. VI, particulièrement p. 232.

8. Charles Bossut, *Traité élémentaire d'hydrodynamique*, 2 vol. (Paris, 1771), I, pp. 124-126.

9. Voir de Prony, *Nouvelle Architecture hydraulique* (Paris) II (1796), pp. 145-151, et Hachette, *Traité élémentaire des machines* (Paris, 1811), pp. 122-125. Pour l'adoption du livre d'Hachette comme manuel à *Polytechnique* l'année avant l'immatriculation de Carnot, voir le livre lui-même, p. iv. Pour la référence de Carnot à de Prony, voir son mémoire p. 87.

10. J.-N. Hachette, *Traité élémentaire des machines* (Paris, 2^e éd., 1819), p. 199. Cette édition introduit une discussion étendue du calcul de l'effet mécanique de la machine à vapeur, bien plus élaborée que dans la première édition.

11. Ce calcul se trouve seulement dans Hachette, 1^{re} éd., pp. 137-139. De Prony fait l'observation qualitativement dans sa *Nouvelle Architecture hydraulique*, II, pp. 145-146.

12. Hachette, *Traité élémentaire des machines*, 2^e éd., pp. 210-216. Pour la patente de Watt, voir la discussion de Carnot dans une longue note dont les parties pertinentes commencent à la page 100. Voir aussi la discussion de la théorie de la machine à détente de Watt dans John Robison, *A System of Mechanical Philosophy*, vol. II (Edinburgh, 1822), pp. 128-130. Carnot connaissait probablement aussi cette discussion, car il fait référence à l'*Encyclopédie britannique* (p. 105 n.) comme une source utile sur les machines à vapeur aussi bien (p. 102 n.) qu'à la formule du «docteur Robinson» (*sic*); cet article [Steam-Engine] apparut tout d'abord dans la 3^e édition [1797] de l'*Encyclopédie britannique*.

13. Watt, cependant, était (ou devint) conscient de l'effet. Voir Robison, *A System of Mechanical Philosophy*, II, p. 167 n. Pour Hachette, voir *Traité élémentaire des machines*, 2^e éd., pp. 197-198, 256-257. Il n'y a aucune discussion semblable du refroidissement adiabatique dans l'édition de 1811 d'Hachette.

14. Des références aux travaux sur le refroidissement adiabatique sont dispersées tout au long du mémoire, mais les travaux les plus avancés sur le sujet auxquels Carnot se réfère (p. 43 n. et p. 59 n.) sont ceux de Laplace et de Poisson. Sur cette question, voir le deuxième article mentionné plus haut dans la note 1, p. 137 n. 28 et 139 n. 33. Carnot connaissait aussi probablement l'importante étude de Poisson décrite p. 139 n. 34.

15. Hachette, *Traité élémentaire des machines* (1811), pp. 144-154, et dans l'édition de 1819, p. 224. Voir aussi l'article de Petit «Sur l'emploi du principe des forces vives dans le calcul de l'effet des machines», cité (p. 86 n.) par Carnot, qui compare également l'air et la vapeur d'eau comme sources d'effet mécanique.

16. Pour la discussion chez Carnot du cycle de la vapeur, voir le mémoire, pp. 17-27. J'ai discuté les imperfections de cette discussion dans le texte cité dans la note 17 ci-après. Cet article fournit également des arguments supplémentaires pour l'intérêt particulier porté par Carnot aux moteurs à air.

17. T.S. Kuhn, «Sadi Carnot and the Cagnard Engine», *Isis*, à paraître. [Cf. *Isis*, 1961, 52, pp. 567-575, reproduit in Otto Mayr, ed., *Philosophers and Machines*, New York, Science History Publications, 1976, pp. 139-146.]

(Traduction de Jacques Grinevald, revue par l'auteur.)

Note du traducteur.

Cette note inhabituellement longue a un double but : commenter notre traduction du titre «Engineering precedent for the work of Sadi Carnot», tout particulièrement les termes *engineering* et *power engineering*, d'une part, et donner quelques indications historiographiques et bibliographiques complémentaires, d'autre part.

Il est juste de reconnaître, comme l'a récemment écrit Pietro Redondi¹, que l'on doit à Thomas S. Kuhn l'impulsion initiale des recherches consacrées aux véritables sources des idées de Sadi Carnot. Toutefois, le terme de technologie française utilisé par Redondi et sans doute un peu trop général pour traduire ici la littérature visée par l'enquête de Kuhn. A l'époque, la notion de technologie désignait beaucoup plus et en fait tout autre chose que la mécanique pratique des machines et des moteurs. On sait que le mot ingénierie, en français, est d'adoption récente. L'utiliser ici serait particulièrement anachronique. Il serait préférable de parler du génie mécanique, mais cette discipline implique une division du travail des ingénieurs qui ne correspond pas non plus avec la pratique de cette profession dans l'Europe pré-industrielle.

Il faut se méfier, même et surtout en histoire des techniques, des illusions inhérentes à toute remontée historique. Il existe, surtout dans la littérature anglo-saxonne, toute une histoire de l'ingénierie (*history of engineering*) qui procède à des découpages qui n'ont de sens que pour notre idéologie industrielle, alors que l'Europe classique vit ou plutôt pense dans le cadre encyclopédique de ce que nous pouvons appeler, comme le suggère d'ailleurs l'*architecture hydraulique* de Bélidor, le paradigme vitruvien². Bien plus, à l'opposé d'une séparation historiographique propre à l'idéologie de l'industrialisation, la redécouverte du corpus des ingénieurs de l'âge classique, issus des grands «artistes-techniciens» de la Renaissance, réclame une réunification de l'histoire des sciences et de l'histoire des techniques³.

Le «précédent technologique» de l'œuvre de Sadi Carnot n'appartient assurément pas à la légende de la machine à vapeur. La réalité technologique du siècle des Lumières et du début du XIX^e siècle est beaucoup plus complexe. Comme on le voit clairement ici, le corpus sur lequel Kuhn attire l'attention ne correspond pas non plus à la littérature magistralement présentée par Jacques Guillaume et Jean Sebestik dans un beau travail collectif intitulé «*Les commencements de la technologie*»⁴. Kuhn se concentre plus précisément sur la littérature pré-thermodynamique consacrée, pour utiliser une expression actuellement en vogue, aux technologies de l'énergie. L'histoire des techniques et surtout de l'*engineering* de langue anglaise utilise couramment l'expression *power technologies*⁵ ou, comme Kuhn, *power engineering*. En 1810, l'ingénieur des Ponts et Chaussées Pierre-Simon Girard (1765-1836) — bien connu dans les études carnotiennes pour avoir présenté les *Réflexions* de Sadi Carnot à l'Académie des sciences et en avoir publié un compte rendu dans la *Revue encyclopédique* — publia sa traduction de la célèbre étude de John Smeaton (1724-1792) citée par Kuhn⁶ avec une importante introduction (32 p.) couvrant l'évolution, au XVIII^e siècle, de la question des «forces motrices», mis à part les machines à feu (pourtant généralement traitées dans le cadre des manuels d'hydraulique) et, contrairement à Navier quelques années plus tard, oubliant les contributions de Lazare Carnot⁷. A l'exemple de la grande figure anglaise de Smeaton⁸, Girard pourrait faire l'objet d'une très intéressante monographie ou tout au moins de plus d'attention⁹.

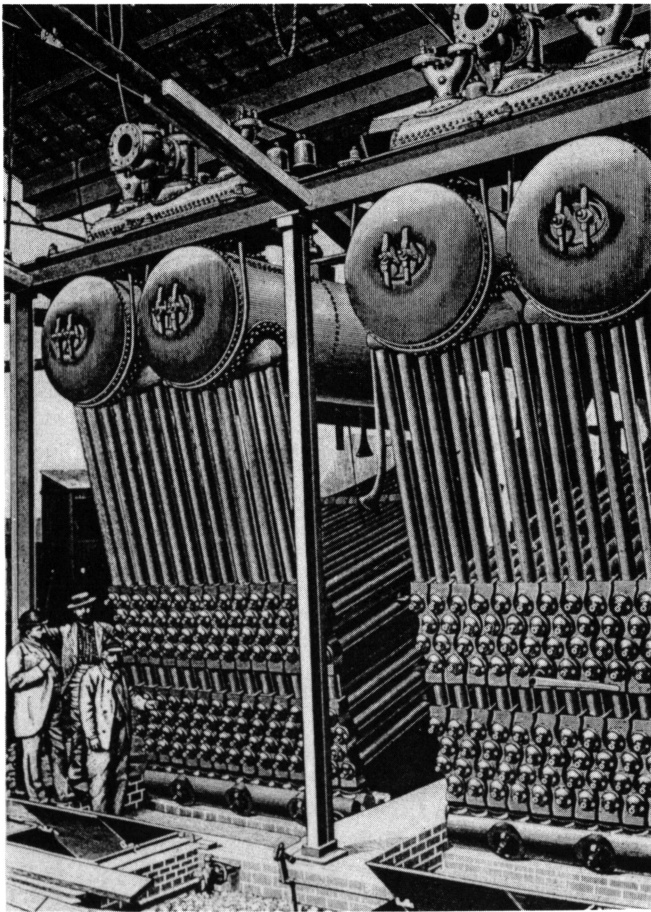
Malgré la place que lui réservent les histoires générales des techniques, la question des technologies de la production de l'énergie reste, encore aujourd'hui, un domaine très lacunaire de notre historiographie du développement de la

civilisation occidentale. Manifestement stimulée par l'actualité, la recherche historiographique dans ce domaine négligé connaît actuellement un essor remarquable. A côté de l'article pionnier de Kuhn (qui lui aussi, toutefois, pourrait donner lieu à une recherche des précédents historiographiques !) et des travaux de Donald S.L. Cardwell¹⁰, on pourrait déjà citer une liste assez longue d'excellentes contributions¹¹. Malgré tout, il reste beaucoup à faire pour réévaluer, dans notre culture occidentale, le rôle de cette recherche technologique de la puissance¹², inséparable de ce que Serge Moscovici a précisément appelé «l'originalité de l'ingénieur»¹³.

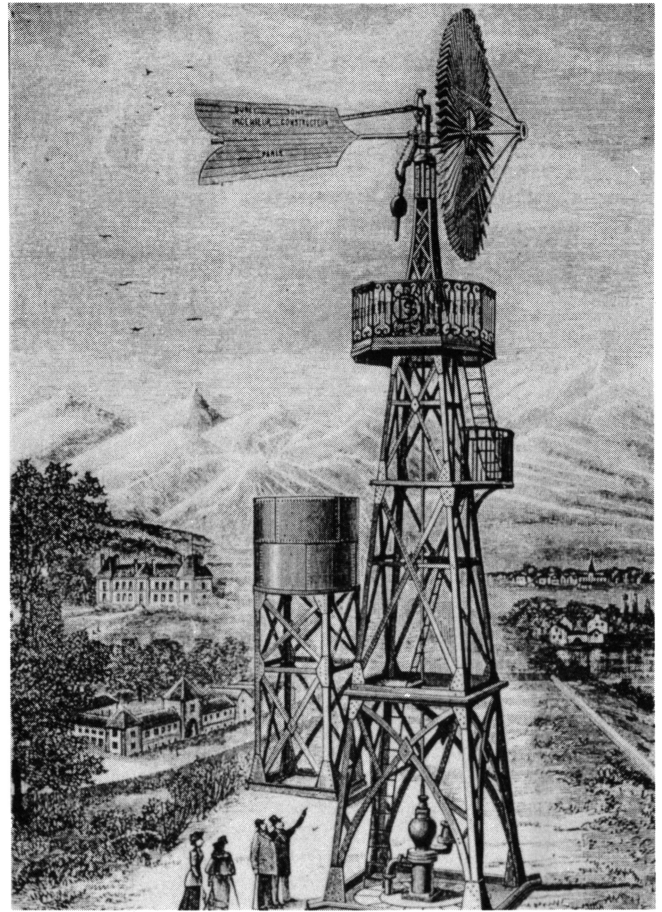
La traduction du texte de Kuhn offre une belle occasion de souligner cette tradition de la science des ingénieurs. Le terme de tradition, comme on vient de le voir, est amplement justifié. Il me semble également s'accorder avec la philosophie de Thomas Kuhn : l'un de ses récents livres s'intitule *The Essential Tension. Selected Studies in Scientific Tradition and Change* (University of Chicago Press, 1977). Il ne reprend pas, malheureusement, «Engineering Precedent for the Work of Sadi Carnot», mais il reproduit son importante étude, tout à fait complémentaire ici, intitulée «Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery» (citée dans la note 4 du texte de Kuhn). Le chapitre 3 de *The Essential Tension* reproduit la version anglaise d'un texte initialement publié en France : «Tradition mathématique et tradition expérimentale dans le développement de la physique» (*Annales, Economies, Sociétés, Civilisations*, 1975, 5, pp. 975-998). Cette dernière étude répond, en partie, à la question soulevée dans la note 3 du texte de Kuhn.

Au carrefour de ces deux traditions, mathématique et technique, l'œuvre scientifique et technologique de Carnot père était, en 1959, mal connue¹⁴, mis à part les *Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitésimal* peut-être. Le récent livre de Charles C. Gillispie sur *Lazare Carnot savant*¹⁵ et l'ouvrage magistral de Wilson L. Scott¹⁶ bouleversent cette situation d'un Carnot essentiellement homme d'Etat, politicien et guerrier, le célèbre «Organisateur de la Victoire». Or, Lazare Carnot, on avait tendance à l'oublier, commença sa carrière comme ingénieur, officier du Corps royal du Génie. Sadi Carnot, comme son père, sera ingénieur militaire, et non pas «physicien». Elève de Monge, le Grand Carnot devint un mathématicien, un savant, membre de l'Institut. On peut penser que le gloire du père, peu appréciée par le pouvoir de la Restauration, porta préjudice à la diffusion des idées de Carnot fils (le frère, Hippolyte, porte également une certaine responsabilité). Mais ce qui nous intéresse ici, c'est la tradition, intellectuelle autant que militaire, du génie, la plus brillante des «armes savantes» de l'Ancien Régime, du point de vue de l'histoire des sciences¹⁷.

La promotion intellectuelle des ingénieurs, liée au développement de la puissance de l'Etat, devait beaucoup à la Renaissance italienne des mathématiques¹⁸ et, en France, au prestige de Sébastien Le Prestre de Vauban (1633-1707), loué à sa mort par Fontenelle (dans son *Eloge* à l'Académie des Sciences) pour avoir «fait descendre les mathématiques du ciel sur la terre». Bien avant Carnot et Monge, ses héritiers, ces savants de la «nation armée» souvent pris en exemples¹⁹, Vauban avait incarné, pour toute l'Europe classique, l'alliance de la science et de la raison d'Etat par excellence, la guerre²⁰. En 1784, comme on sait, Lazare Carnot se signala par un brillant *Eloge de Vauban* dans lequel il célébrait les qualités d'un ingénieur qui excelle comme «guerrier, géomètre et homme d'Etat», en quelque sorte un autoportrait antidaté de sa propre carrière. Bien qu'artilleur (et professeur de mathématiques) et non ingénieur du Génie, Bélidor était le disciple le plus renommé de Vauban²¹. Sa renommée durera un siècle.



Vue arrière de 2 chaudières Babcock et Wilcox. 1897.



Aéro-moteur de M. Durey-Soby monté sur un pylône en fer et actionnant une pompe.

Smeaton, comme la plupart des grands ingénieurs de son temps, avait médité son Bélidor, bien connu des Anglais²². Sur la question du rendement des machines hydrauliques, qui nous intéresse ici, Bélidor avait suivi et diffusé la théorie erronée de Parent. Toutefois, pour l'avancement de la science des machines, mieux valait une théorie fautive que pas de théorie du tout. A partir de Parent, en effet, le perfectionnement théorique et pratique des moulins sera l'un des traits marquants du « progrès » de l'Europe des Lumières. Il est fâcheux de voir l'historiographie de la révolution industrielle l'oublier. La mythologie du siècle de la vapeur a refoulé le siècle de Bélidor dans un âge pré-scientifique et notre monothéisme énergétique a occulté la multiplicité des voies du développement, comme on dit de nos jours. Bien plus, on a oublié que la technologie des machines à feu, avant la révolution thermodynamique, se développait, pour ainsi dire, dans le cadre du paradigme de l'*architecture hydraulique*, comme en témoignent non seulement Bélidor et de Prony mais encore toute la littérature sur la « science appliquée » de cet âge d'or de l'hydrodynamique²³.

Le nom de Smeaton à côté de ceux de Bélidor, Coulomb et Lazare Carnot, ne doit pas non plus faire oublier que l'ingénieur *civil* anglais illustrait, à l'époque où Adam Smith (1723-1790) publiait ses fameuses *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*²⁴, l'essor d'une profession²⁵ qui cherchait à se démarquer de la tradition *militaire* en honneur sur le Continent et tout particulièrement en France.

Ce dernier point fait aussi partie des racines historiques de ce que nous pouvons appeler la révolution carnotienne, en n'oubliant pas que Carnot la science est fils de Carnot la guerre²⁶. Autrement dit, la filiation entre Carnot père et Carnot fils est plus profonde et plus lourde de sens que l'analyse purement conceptuelle le donne à penser. Cette dernière, inscrite manifestement dans la métaphore hydraulique

utilisée par Sadi Carnot et dans l'hommage rendu à la Mécanique appliquée de son père²⁷, avait été clairement esquissée dès 1930 par Charles Brunold dans sa thèse, toujours utile, sur l'entropie²⁸. Depuis longtemps, en fait, les théoriciens de « la science de l'énergie » avaient reconnu en Sadi Carnot le « digne héritier de l'auteur des *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*²⁹ », mais, comme le signale Kuhn, ils ne s'étaient généralement pas donnés la peine d'examiner en détail cette parenté.

Contemporaine de la « Théorie des machines simples³⁰ » de Charles-Augustin Coulomb (1736-1806), également officier du Corps royal du Génie, la science des machines de Lazare Carnot devait marquer, au dire de Navier (mais Hachette, Guenyeau, Coriolis et d'autres partageaient cette opinion), une impulsion nouvelle dans l'évolution de la tradition rappelée dans le bref historique de 1818 et surtout dans la monumentale édition critique de l'*Architecture hydraulique* de Bélidor³¹.

Comme Navier, Girard — dans son introduction historique aux *Recherches* de Smeaton — remontait au mémoire de 1704 de Parent³² dont la renommée européenne avait été assurée par le premier tome de l'*Architecture hydraulique* (1737) de Bélidor. Les développements scientifiques de la théorie des roues hydrauliques reposèrent, vers le milieu du XVIII^e siècle, sur la critique de cette première théorie Parent-Bélidor³³.

A la suite de Parent lui-même, Navier rendait hommage à Galilée. Comme l'a bien noté Arnold Pacey, l'un des meilleurs connaisseurs de cet essor technologique européen³⁴, les travaux d'Antoine Parent (1666-1716), comme ceux de Guillaume Amontons (1663-1705), également pertinents ici, appartiennent à ce qu'il faut bien appeler la révolution galiléenne³⁵.

Notes du traducteur.

1. Pietro Redondi, «Sadi Carnot et la recherche technologique en France de 1825 à 1850», *Revue d'histoire des sciences*, 1976, 29, pp. 243-259, cit. p. 246.
2. Jacques Grinevald, «L'Architecture hydraulique au XVIII^e siècle : un paradigme vitruvien», Genève, Institut universitaire d'études du développement, Itinéraires, notes et travaux, 1979. (Nouvelle édition en préparation.)
3. Voir A.E. Musson et Eric Robinson, *Science and Technology in the Industrial Revolution*, Manchester, Manchester University Press, 1969.
4. J. Guillerme et Jean Sebestik, «Les commencements de la technologie», *Thalès*, année 1966, t. 12, Paris, P.U.F., 1968, pp. 1-72.
5. Voir Donald S.L. Cardwell, «Power technologies and the advance of science, 1700-1825», *Technology and Culture*, 1965, 6, pp. 188-207.
6. John Smeaton, «An Experimental Enquiry Concerning the Natural Powers of Water and Wind to Turn Mills and other Machines Depending on a Circular Motion», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1779, 51, pp. 100-174. (Éditions à part en 1760 et 1796.)
7. J. Smeaton, *Recherches expérimentales sur l'eau et le vent, considérés comme forces motrices applicables aux moulins et autres machines à mouvement circulaire*, etc.; suivies d'expériences sur la transmission du mouvement et la collision des corps, ouvrage traduit de l'anglais et précédé d'une introduction par P.-S. Girard, Paris, Bachelier, 2^e éd., 1827 (1^{re} éd., 1810).
8. Voir A.W. Skempton, ed., *John Smeaton, F.R.S.*, London, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Ltd, 1981.
9. Sur Girard et de Prony, voir Jacques Payen, *Capital et machine à vapeur au XVIII^e siècle*. Les frères Périer et l'introduction en France de la machine à vapeur de Watt, Paris, Mouton, 1969. A mettre en parallèle : MM. Prony et Girard, «Rapport sur le Mémoire de M. Burdin intitulé : Des Turbines hydrauliques ou Machines rotatoires à grande vitesse», *Annales de chimie et de physique*, 1824, 26, pp. 207-217.
10. Voir notre traduction, également accompagnée d'une note complémentaire, de Donald S.L. Cardwell, «Power Technologies and the Advance of Science, 1700-1825», *op. cit.*
11. Voir surtout les études d'Arnold Pacey, de Norman Smith, de Terry S. Reynolds pour le perfectionnement des roues hydrauliques. Pour les débuts des machines à feu, voir L.T.C. Rolt et J.S. Allen, *The Steam Engine of Thomas Newcomen*, New York, Science History Publications, 1977. Milton Kerker, «Science and the steam engine», *Technologie and Culture*, 1961, 2, pp. 381-390.
12. Voir «The Concept of a Power Technology» in Lynn White jr., *Medieval Technology and Social Change*, London, Oxford University Press, 1962, p. 129 ss. (Trad. fr. *Technologie médiévale et transformation sociales*, Paris, Mouton, 1969.)
13. Serge Moscovici, *Essai sur l'histoire humaine de la nature*, Paris, Flammarion, 1968, p. 199 ss.
14. Voir toutefois le chap. X de René Dugas, *Histoire de la mécanique*, Neuchâtel, Griffon, 1950.
15. Charles C. Gillispie, *Lazare Carnot savant*, Princeton, Princeton University Press, 1971. Traduction française, même titre, Paris, Vrin, 1979.
16. Wilson L. Scott, *The Conflict between Atomism and Conservation Theory 1644 to 1860*, London, New York, Macdonald, Elsevier, 1970, chap. 5 et 6.
17. Voir René Taton, ed., *Enseignement et diffusion des sciences en France au XVIII^e siècle*, Paris, Hermann, 1964. Voir aussi l'étude sociologique d'Anne Blanchard, *Les Ingénieurs du «Roy» de Louis XIV à Louis XVI*, Montpellier, Université Paul-Valéry, Centre d'histoire militaire et d'études de défense nationale de Montpellier, 1979. Autre mine de renseignements : Jean Mascart, *La Vie et les travaux du chevalier Jean-Charles de Borda (1733-1799)*, Paris, Lyon, Picard, Rey, 1919. (Revendiqué pour Borda le «théorème de Carnot».)
18. Voir le beau livre de Paul Lawrence Rose, *The Italian Renaissance of Mathematics*, Genève, Droz, 1976. Bertrand Gille, *Les Ingénieurs de la Renaissance*, Paris, Hermann, 1964, 2^e éd., Seuil, 1978.
19. Joseph Fayet, *La Révolution française et la science*, Paris, Marcel Rivière, 1960. John U. Nef, *La Route de la guerre totale*, Cahiers de la Fondation nationale des sciences politiques, Paris, Armand Colin, 1949. *La Guerre et le progrès humain*, trad. de l'américain (1950), Paris, Alsatia, 1954.
20. Henri Guerlac, «Vauban : l'impact de la science sur la guerre», in E.M. Earle, *Les Maîtres de la stratégie*, trad. de l'anglais, Paris, Berger-Levrault, t. 1, 1980, pp. 39-64.
21. Les *Œuvres diverses de M. Bélidor* (Amsterdam, Leipzig, 1754) contiennent aussi des textes de Vauban.
22. Sur cette question de «transfert de technologie», encore trop peu étudiée, voir Stanley B. Hamilton, «Continental influences on British civil engineering to 1800», *Archives internationales d'histoire des sciences*, 1958, 11 pp. 347-355. A.E. Musson et E. Robinson, *Science and Technology in the industrial Revolution*, *op. cit.*
23. C'est un aspect oublié par la belle étude de Roger Hahn, *L'Hydrodynamique au XVIII^e siècle. Aspects scientifiques et sociologiques*, Conférence donnée au Palais de la Découverte le 7 novembre 1964, Paris, 27 p. L'œuvre de John Smeaton illustre bien — non pas la transition entre l'eau et la vapeur — mais la complémentarité, à l'époque, de l'eau et de la vapeur. L'histoire des techniques, comme l'histoire des sciences, doit se méfier des pièges de l'ethnocentrisme et de l'évolutionnisme linéaire. Sur Smeaton, voir encore Samuel Smiles (1812-1904), «Life of John Smeaton», *Lives of the Engineers*, London, Murray, vol. 2, 1862, pp. 1-89. Paul N. Wilson, «The Waterwheel of John Smeaton», *Transactions of the Newcomen Society*, 1955-57, 30, pp. 25-48. L.T.C. Rolt et J.S. Allen, *The Steam Engine of Thomas Newcomen*, *op. cit.*
24. Adam Smith, lecteur également de Bélidor, est donc bien plus le contemporain de Smeaton que de James Watt, et les dissertations récentes faites sur la signification de l'année «révolutionnaire» de 1776 me paraissent vraiment exagérées.
25. Voir A.W. Skempton et Esther Clark Wright, «Early Members of the Smeatonian Society of Civil Engineers», *Transactions of the Newcomen Society*, 1971-72, 44, pp. 23-47. Denis Smith, «The professional correspondence of John Smeaton: an 18th-century consulting engineering practice», *Transactions of the Newcomen Society*, 1974-75, 47, pp. 179-189.
26. Michel Serres, *Hermès III, la traduction*, Paris, Minuit, 1974, p. 241. Jacques Grinevald, «La Révolution carnotienne. Thermodynamique, économie et idéologie», *Revue européenne des sciences sociales et Cahiers Vilfredo Pareto*, 1976, 36, pp. 39-79. «Révolution industrielle, technologie de la puissance et révolutions scientifiques», in *La fin des outils : technologie et domination*, Cahiers de l'IUED, Genève, Paris, P.U.F., 1977, 5, pp. 147-202. «Diversité culturelle ou technologie de la puissance?», *L'Homme et l'Humanité*, F.R.H., Paris, 1978, 63, pp. 17-20. «Une thermodynamique à visage humain», *La Revue polytechnique*, Genève, 1978, 6372, pp. 415-423. «Mars et le génie de l'Occident», *CoEvolution*, Paris, 1981, 3, pp. 65-68.
27. Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Paris, Bachelier (éd. fac-similé Blanchard, 1953), p. 8.
28. Charles Brunold, *L'Entropie. Son rôle dans le développement de la thermodynamique*, Paris, Masson, 1930, 1^{re} partie, chap. 1, «L'œuvre de Sadi Carnot», pp. 17-55.
29. Voir Georges Mouret, «Sadi Carnot et la science de l'énergie», *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 1892, 13, pp. 465-472. Il faudrait aussi mentionner l'étude peu connue de R. Anthouard, «Aperçus sur la recherche scientifique en France sous la Révolution et l'Empire. I.- Lazare Carnot, organisateur du travail scientifique (1753-1823). II.- Les origines du mémoire de Sadi Carnot (1824)», *Thalès*, années 1937-39, Paris, P.U.F., 1940, pp. 186-198.
30. Voir Charles C. Gillispie, *Lazare Carnot savant*, *op. cit.* C. Stewart Gillmor, *Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France*, Princeton, Princeton University Press, 1971. Charles-Augustin Coulomb, *Théorie des machines simples*, nouvelle édition, Paris, Bachelier, 1821.
31. Navier, «Détails historiques sur l'emploi du principe des forces vives dans la théorie des machines, et sur diverses roues hydrauliques», *Annales de chimie et de physique*, 1818, 9, pp. 146-159. Bélidor, *Architecture hydraulique*, 1^{re} partie, t.I., nouvelle édition avec des notes et additions par M. Navier, Paris, Firmin Didot, 1819, 666 p.
32. Antoine Parent, «Sur la plus grande perfection possible des machines étant donnée une machine qui ait pour puissance motrice quelque fluide que ce soit, l'eau, le vent, la flamme, &c...», *Histoire de l'Académie royale des sciences*, année 1704, avec les Mémoires, Amsterdam, Gerard Kuyper, 1707, pp. 144-152, Mémoire pp. 432-451. (2^e éd., 1772, pp. 323-338.) Bélidor, *Architecture hydraulique* (éd. Navier), *op. cit.* p. 334. Dans l'«Eloge de M. Parent» (*Histoire de l'Académie royale des sciences*, année 1716, Amsterdam, 1719, pp. 108-114), Fontenelle dit que ce professeur de mathématiques, élève à l'Académie de M. de Billetes (Mécanicien), gagnait sa vie en enseignant les Fortifications «parce que la Guerre ne mettait que trop cette Science à la mode».
33. Voir Arnold J. Pacey, *The Perfection of the Water-Wheel, 1680-1830*, York, Institute of Advanced Architectural Studies, 1967, inédit. D.S.L. Cardwell, «Some factors in the early development of the concepts of power, work and energy», *British Journal for the History of Science*, 1967, 3, pp. 209-224. Terry S. Reynolds, «Scientific Influences on Technology : The Case of the Overshot Waterwheel, 1752-1754», *Technology and Culture*, 1979, 20, pp. 270-295.
34. Arnold J. Pacey, *The Maze of Ingenuity. Ideas and Idealism in the development of technology*, London, Allen Lane, 1974; rééd. The MIT Press, 1976. «Some early heat engine concepts and the conservation of heat», *British Journal for the History of Science*, 1974, 7, pp. 135-145. G.R. Talbot et A.J. Pacey, «Antecedents of thermodynamics in the work of Guillaume Amontons», *Centaurus*, 1971, 16, pp. 20-40.
35. Voir Claire Salomon-Bayet, *L'Institution de la science et l'expérience du vivant*, Paris, Flammarion, 1978.