



« Réflexions » de Sadi Carnot: itinéraire d'une publication qui marqua un tournant dans les sciences et techniques

Cycle de conférences « Un livre, une histoire », Liège, le 28 novembre 2024

Vincent Lemort

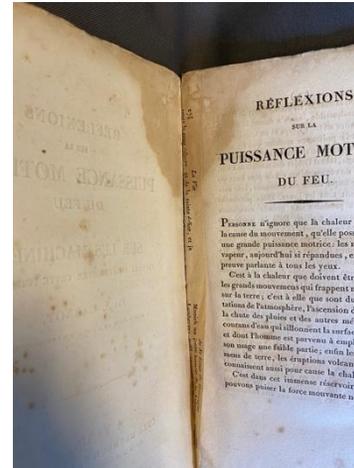
Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège

vincent.lemort@uliege.be

Introduction



Introduction



Papier réemployé?
« La vie de Saint Louis de Gonzague »

Inscription en 1935 au registre d'inventaire de la bibliothèque de l'Université de Liège de l'ouvrage de Sadi Carnot
Source: Inventaire de la bibliothèque de l'Université de Liège, Réserve B, vol. 1, 1935-1936.

RESERVE Catalogue des Livres acquis l'an 1935-36. E

NUMERO DU CATALOGUE	DATE DE L'ACHAT	NOM DU VENDEUR	TITRE DU LIVRE	FORMAT	VOLUMES	PREX		INSCRIT DANS LE CATALOGUE DES MATIERES ET MIS A LA BIBLIOTHEQUE	NOMS DES DONATEURS
						FRANCS	CENT.		
369	17.9	H. G. J. J. J.	Carnot, Sadi Nicolas Recherches sur la puissance motrice du feu. 2 tomes. Paris, Bachelier, 1824.		4				
370	17.9	maison 17.9.17.9	Thomas, Hubert Recherches sur la puissance motrice du feu. 2 tomes. Paris, Bachelier, 1824.						
371	17.9	maison 17.9.17.9	Homère Iliade. Paris, Bachelier, 1824.						
372	17.9	maison 17.9.17.9	De La Framboisière, J. C. Traité de la puissance motrice du feu. Paris, Bachelier, 1824.						
373	17.9	maison 17.9.17.9	Le Clercq, J. C. Traité de la puissance motrice du feu. Paris, Bachelier, 1824.						
374	17.9	maison 17.9.17.9	Petra-Santa, D. C. Traité de la puissance motrice du feu. Paris, Bachelier, 1824.						
375	17.9	maison 17.9.17.9	Erasmus, D. C. Traité de la puissance motrice du feu. Paris, Bachelier, 1824.						
376	17.9	maison 17.9.17.9	Le Maire de Belges, J. C. Traité de la puissance motrice du feu. Paris, Bachelier, 1824.						

Agenda

- Introduction
- L'auteur
- Le contexte de l'écriture
- La forme du Livre
- Le fond du livre
 - L'introduction
 - La contribution scientifique
 - La conclusion
- La diffusion des idées (très fécondes) du livre
- Conclusions

L'auteur du livre

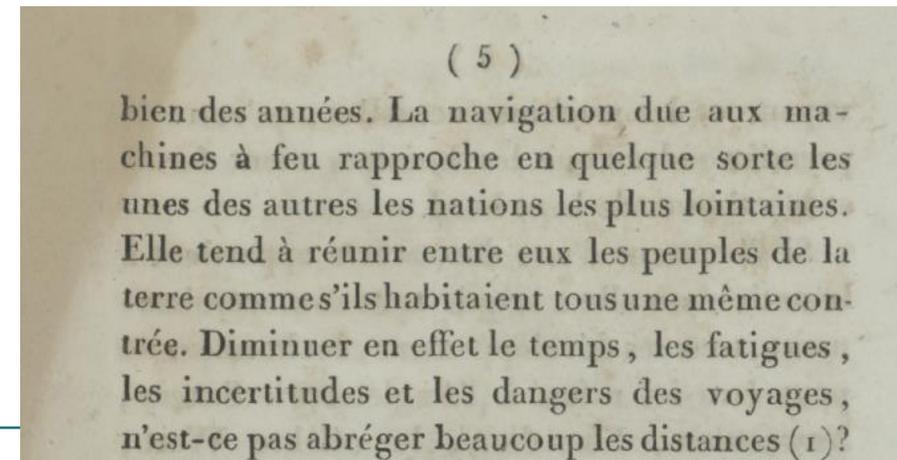


Sadi Carnot en uniforme d'élève de l'École Polytechnique, 1813. Peinture sur huile de Louis-Léopold Boilly.

- **Sadi Carnot** est né en 1796 (28 ans au moment d'écrire le livre)
- Sadi est le fils de **Lazare Carnot** (1753-1823),
 - ✓ un militaire (chef de guerre révolutionnaire de 1792-95): « organisateur de la victoire »)
 - ✓ homme d'état (membre du Directoire)
 - ✓ scientifique :écrit en 1782 son premier ouvrage « Essai sur les machines en général », en 1797 « Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitésimal »... Contribue à la mise en place de l'École polytechnique.
 - ✓ poète: Sadi fait référence au poète persan du moyen âge Sâadi de Chiraz)

L'auteur du livre

- Sadi Carnot rentre à l'Ecole polytechnique en 1812 et puis à l'Ecole d'application de l'artillerie et du Génie de Metz en 1814
- Il sort de l'école en 1817, prêt à entamer une carrière militaire
- Nommé lieutenant d'Etat-Major en 1819 (Paris), il bénéficie d'une mise en disponibilité pour se consacrer à l'étude scientifique.
- Vit chez son oncle dans un petit appartement du Marais, étudie au CNAM, visite des ateliers...
- Rend visite à son père exilé à Magdebourg en 1821 (premiers bateaux à vapeur sur l'Elbe en 1818 (Bertrand, 2024))



Le contexte de l'écriture du livre: l'essor des machines à vapeur

- Sadi Carnot était impressionné par l'avance technologique de l'Angleterre dans le domaine des machines à vapeur (« la machine à feu »).



Woolf steam engine 1858 (licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license)

(6)

vapeur et les machines actuelles , qu'entre le premier radeau que les hommes aient formé et le vaisseau de haut bord.

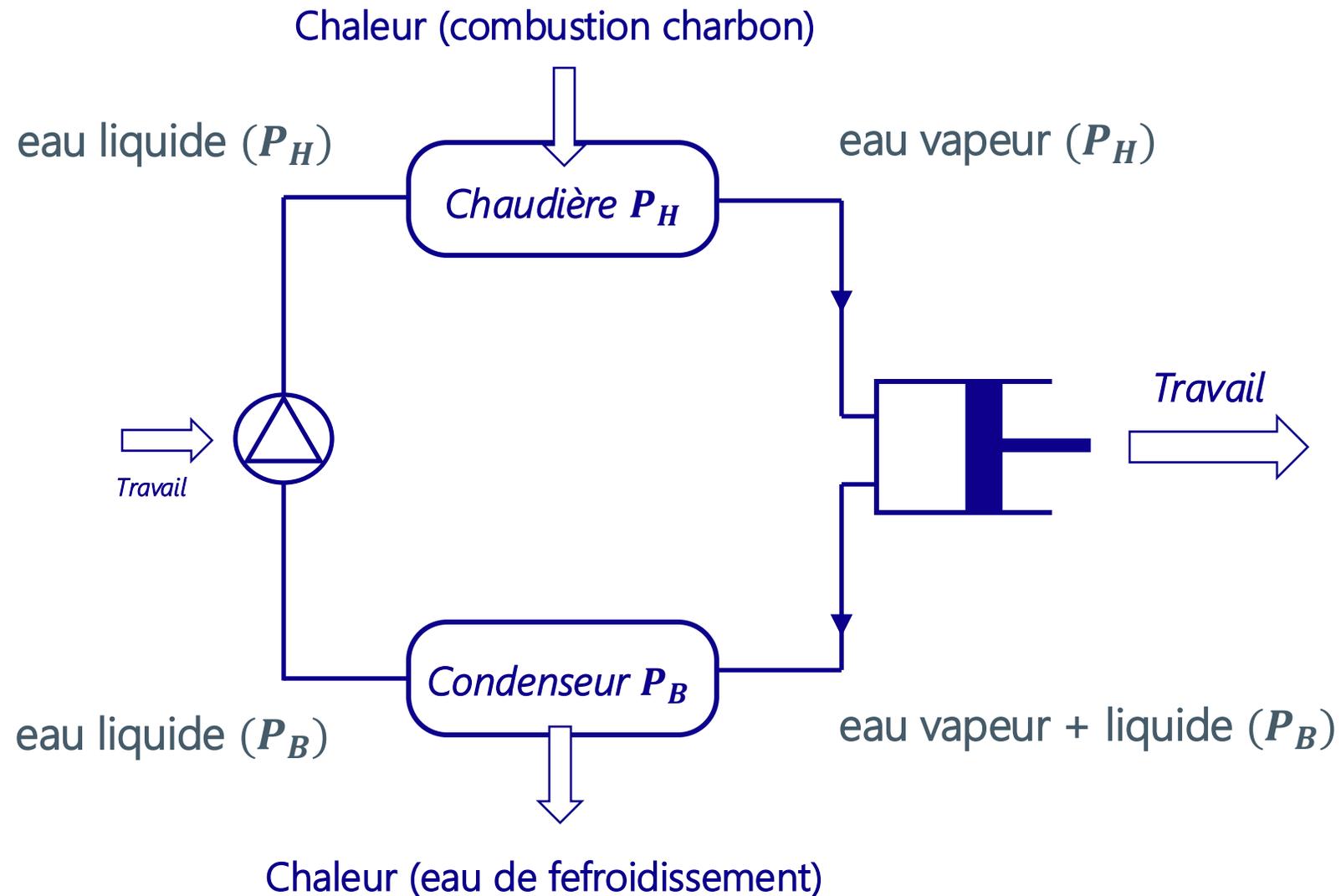
Si l'honneur d'une découverte appartient à la nation où elle a acquis tout son accroissement , tous ses développemens , cet honneur ne peut être ici refusé à l'Angleterre : Savery , Newcomen , Smeathon , le célèbre Watt , Woolf , Trevetick et quelques autres ingénieurs anglais , sont les véritables créateurs de la machine à feu ; elle a acquis entre leurs mains tous ses degrés successifs de perfectionnement . Il est naturel , au reste , qu'une invention prenne naissance et surtout se développe , se perfectionne , là où le besoin s'en fait le plus impérieusement sentir .

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 , et les essais d'amélioration tentés sur elles sont encore dirigés presque au hasard .

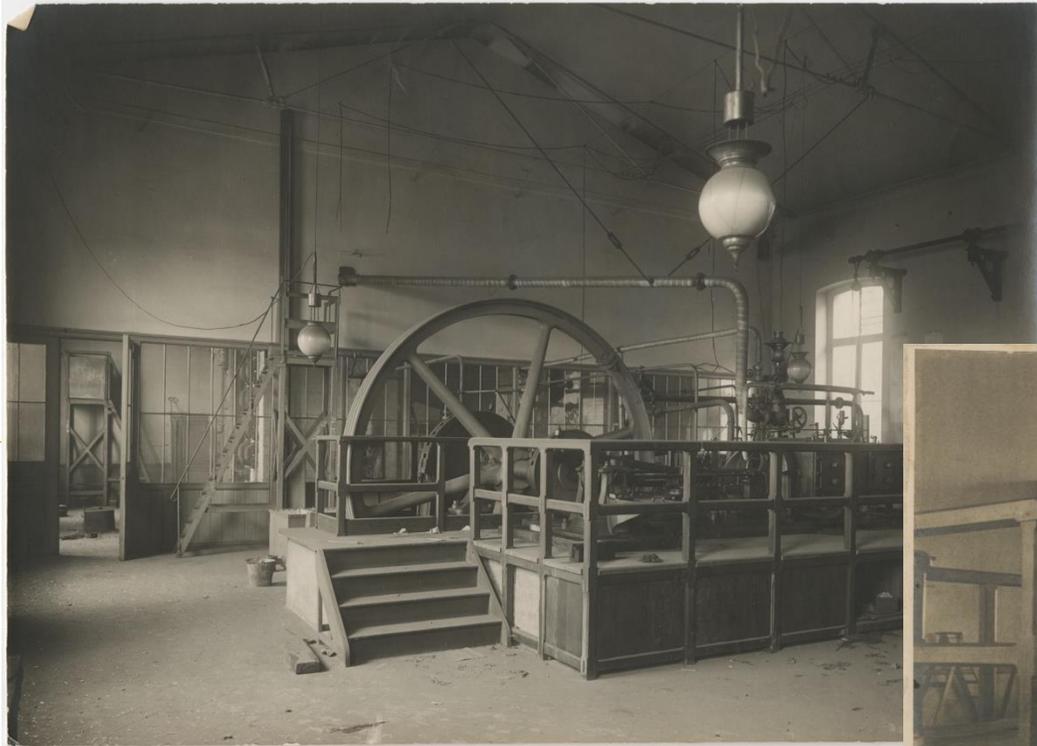
L'on a souvent agité la question de savoir si la puissance motrice (r) de la chaleur est

(r) Nous nous servons ici de l'expression puissance motrice pour désigner l'effet utile qu'un moteur est capable de produire . Cet effet peut toujours être assimilé à l'élé-

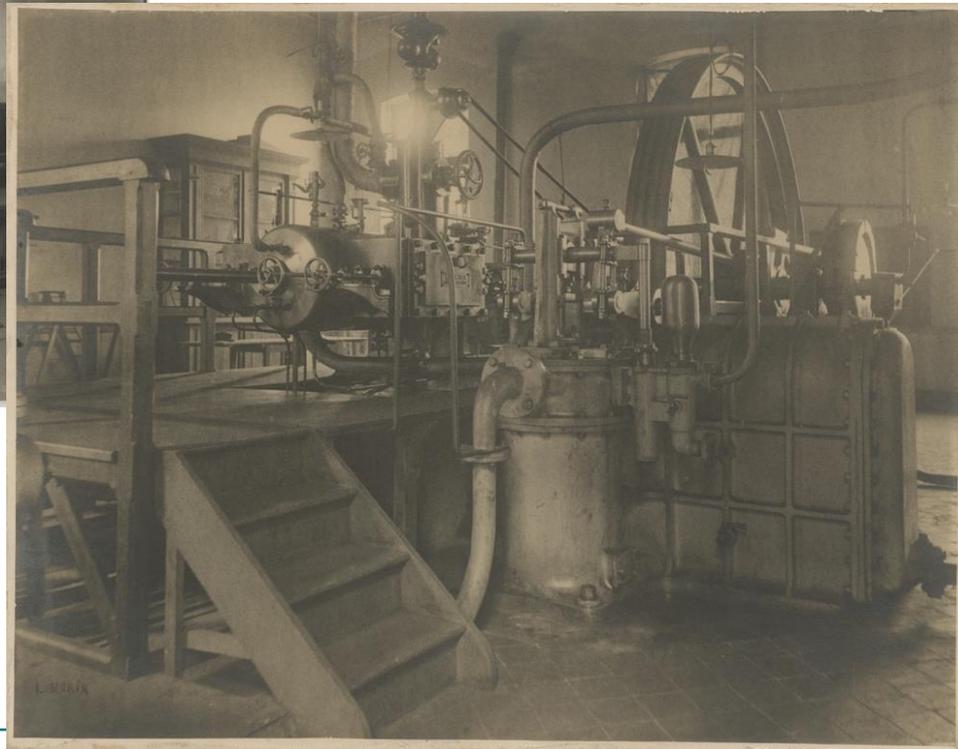
Le contexte de l'écriture du livre: l'essor des machines à vapeur



Le contexte de l'écriture du livre: l'essor des machines à vapeur



Vue du moteur à vapeur Beer en 1918. Université de Liège - Dommages de guerre - Laboratoire de mécanique - Salle des machines, Fonds photographique des dommages de la guerre 1914-1918 faits aux bâtiments de l'Université de Liège (positifs), Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43205, 1918. © Musée Wittert ULiège



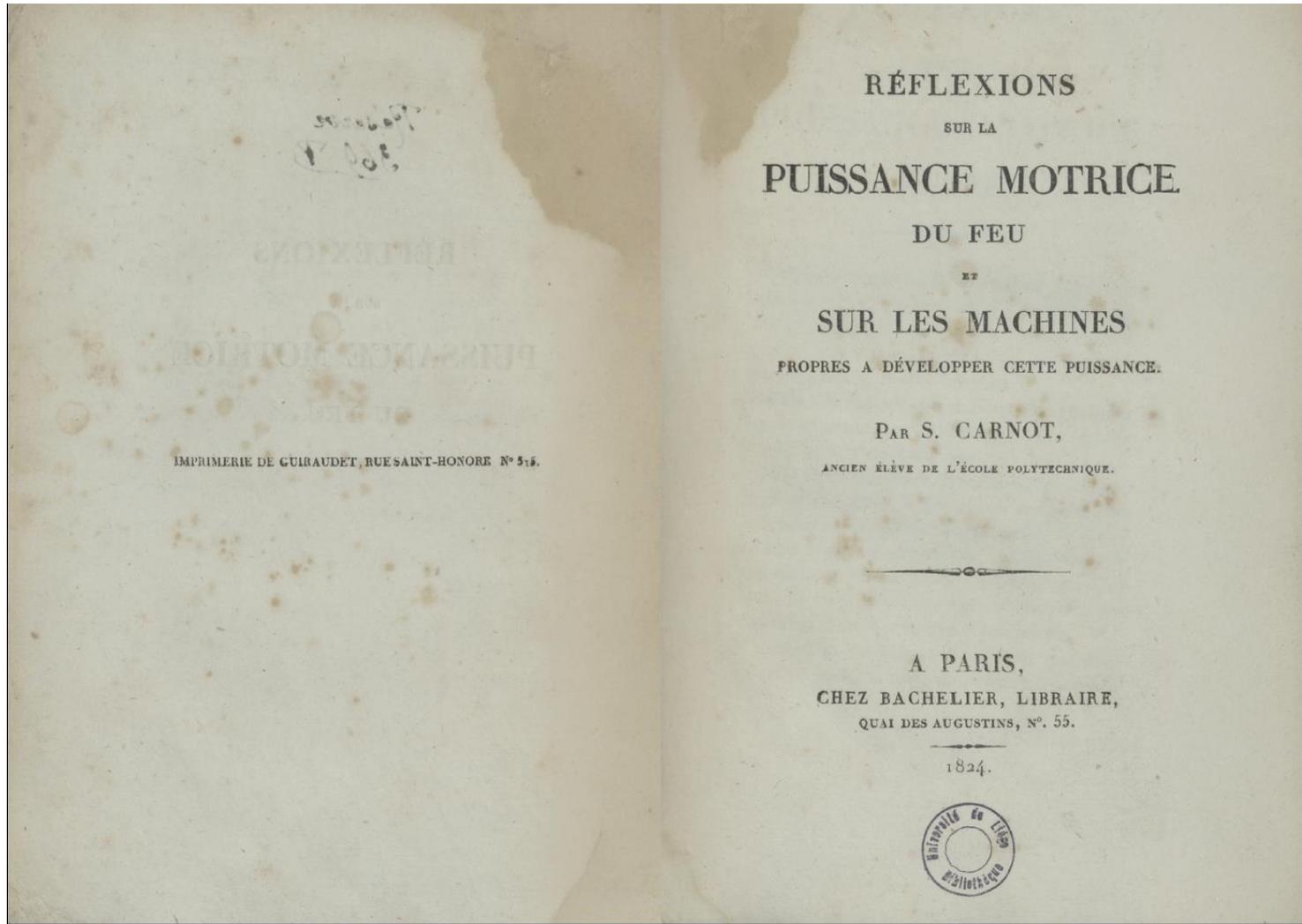
Autre vue du moteur à vapeur Beer. L. MORIN, Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43230, s.d. © Musée Wittert ULiège

Le contexte de l'écriture du livre: l'essor des machines à vapeur



Vue de la chaudière de la machine à vapeur. L. MORIN, Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43233, s.d. © Musée Wittert ULiège

La forme du livre



- Imprimé en 1824
- 118 pages
- Quelques tables (propriétés des gaz)
- Peu d'équations mathématiques (mis à part dans les notes de bas de page)

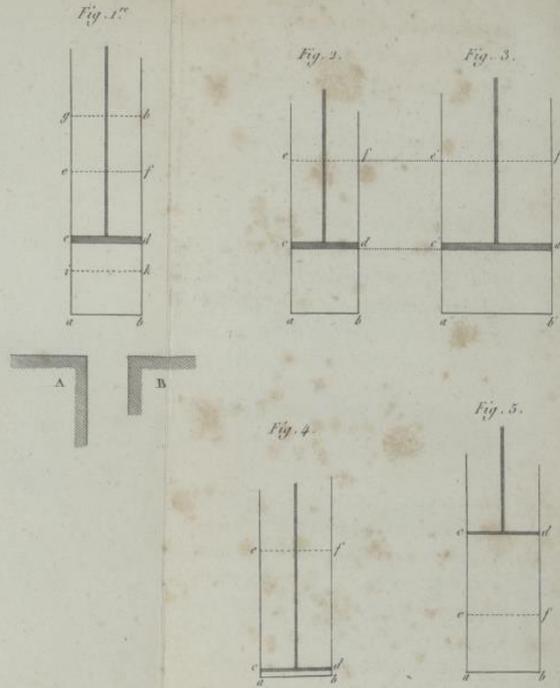
« M. S. Carnot évitant l'emploi de l'analyse mathématique, arrive par une série de raisonnements délicats et difficiles à saisir, à des résultats qui se déduisent sans peine d'une loi plus générale, que je vais chercher à établir » (Clapeyron, 1834)

La forme du livre

(118)

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.

FIN.



- Pas de chapitres ni de sections (et donc pas de table des matières)
- 5 figures
- Références à des savants du XIXe siècle (chercheurs/professeurs): Clément Desormes,...

La forme du livre

Imprimerie de Guiraudet et Gallay,
 Rue Saint-Jouéré, N° 315, vis-à-vis Saint-Roch.

Mémoire des Impressions faites au compte
 de Monsieur Carnot
 pendant le mois de Mars

Paris, le 2 Juin 1824

Réflexion sur la puissance motrice du feu

in 8° Cicero — 9 feuilles 3/4	Comp. à 12. —	93. "
14 pag. petit tou		8. "
22 lignes, opération au petit tou		3. 20
20. — w — w — au Cicero		2. 50
3 Colons à 1. 50		4. 50
2. — w — à 2. 50		5. "
Comptendu f. 1. 200 (9 h. 1/2)		4. 25
. w — de f. 400 (10 h. 1/2)		5. 25
. w — f. 5 (2: fin) et f. 6 (10 h. 1/2)		6. 75
Encre à 600 feuilles, à 7. 20 la ff		7. 60
		<hr/>
		190. 05
Rapport à 60%		114. "
9 R. Comp. papier à 13. 50		121. 50
Brosage		30. "
		<hr/>
Pour acquies		151. 55
		<u>Guiraudet et Gallay</u>

Facture de Réflexion sur la puissance motrice du feu chez la
 Maison de l'Éditeur, 459,99 F (2 juin 1824)
 Source: Archive privée de la famille Carnot, France | Very kindly
 authorized by the Carnot family

Agenda

- Introduction
- L'auteur
- Le contexte de l'écriture
- La forme du Livre
- **Le fond du livre**
 - **L'introduction**
 - Les questions centrales
 - La contribution scientifique
 - La conclusion
- La diffusion des idées (très fécondes) du livre
- Conclusions

L'introduction du livre

- Pose le cadre de la réflexion de l'auteur
- Sadi Carnot souligne l'importance de la **chaleur** dans la création de puissance motrice sur terre (mouvement des nuages, les chutes de pluie, les courants d'eau, les éruptions volcaniques...)
- La nature offre une **source de combustible infinie** (le charbon)
- La machine à vapeur se déploie dans tous les domaines et deviendra le **moteur universel**

(2)

nos besoins ; la nature, en nous offrant de toutes parts le combustible, nous a donné la faculté de faire naître en tous temps et en tous lieux la chaleur et la puissance motrice qui en est la suite. Développer cette puissance, l'appropriier à notre usage, tel est l'objet des machines à feu.

L'étude de ces machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours. Elles paraissent destinées à produire une grande révolution dans le monde civilisé. Déjà la machine à feu exploite nos mines, fait mouvoir nos navires, creuse nos ports et nos rivières, forge le fer, façonne les bois, écrase les grains, file et ourdit nos étoffes, transporte les plus pesans fardeaux, etc. Elle semble devoir un jour servir de moteur universel et obtenir la préférence sur la force des animaux, les chutes d'eau et les courans d'air. Elle a, sur le premier de ces moteurs, l'avantage de l'économie ; sur les deux autres, l'avantage inappréciable de pouvoir s'employer en tous temps et en tous lieux, et de ne jamais souffrir d'interruption dans son travail.

Si quelque jour les perfectionnemens 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

L'introduction du livre

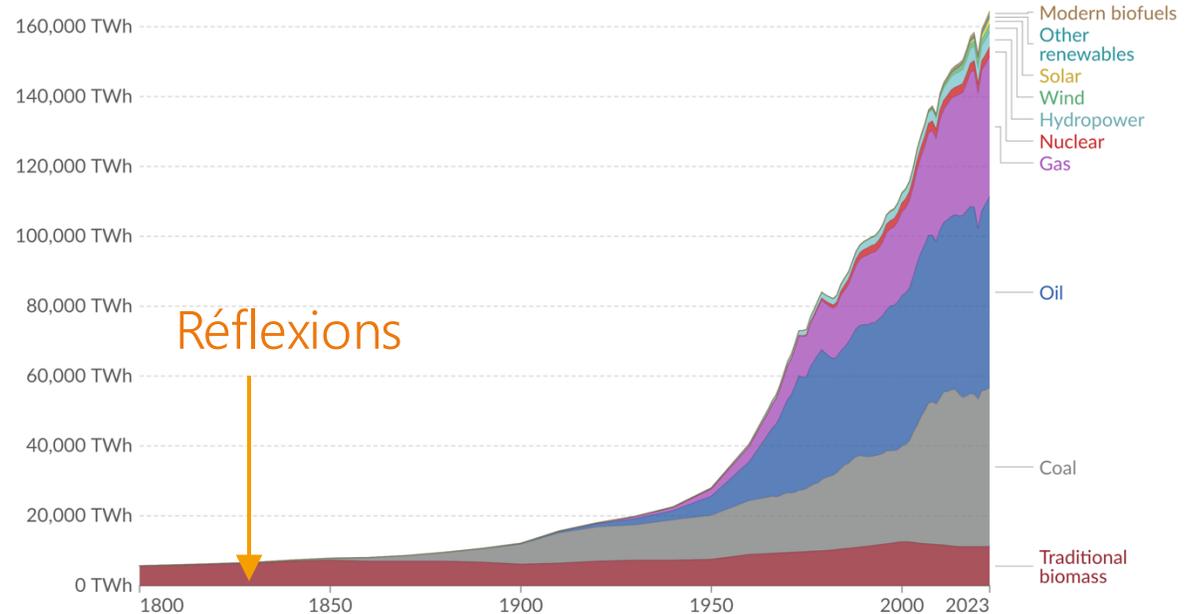
Moteur universel + source de combustible infinie...

... Carnot avait vu juste lorsqu'il prédisait une grande révolution (Chevrier, 2024)

Global direct primary energy consumption

Energy consumption is measured in terawatt-hours¹, in terms of direct primary energy². This means that fossil fuels include the energy lost due to inefficiencies in energy production.

Our World in Data



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024); Smil (2017)

OurWorldinData.org/energy | CC BY

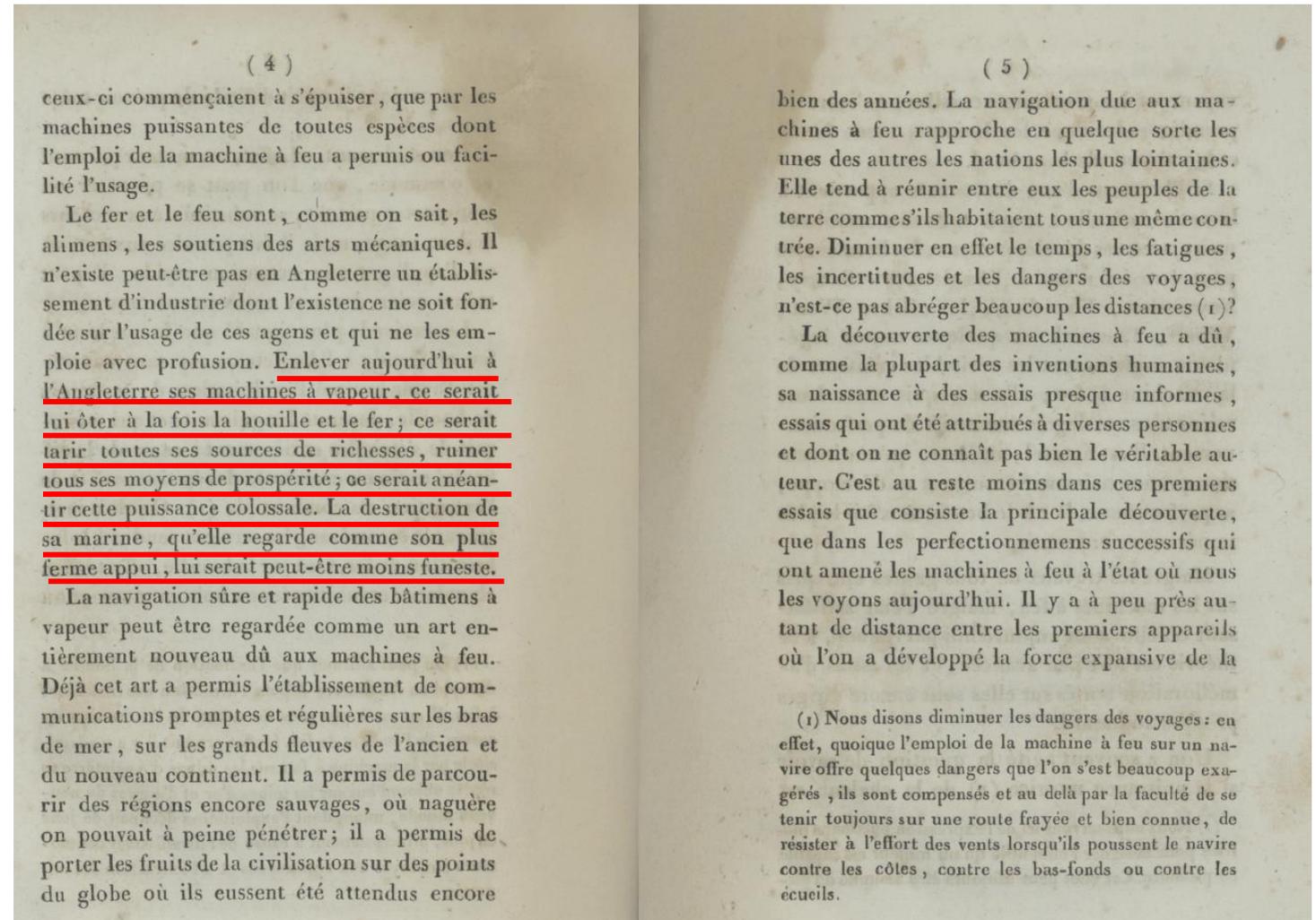
Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

1. Watt-hour: A watt-hour is the energy delivered by one watt of power for one hour. Since one watt is equivalent to one joule per second, a watt-hour is equivalent to 3600 joules of energy. Metric prefixes are used for multiples of the unit, usually: - kilowatt-hours (kWh), or a thousand watt-hours. - Megawatt-hours (MWh), or a million watt-hours. - Gigawatt-hours (GWh), or a billion watt-hours. - Terawatt-hours (TWh), or a trillion watt-hours.

2. Primary energy: Primary energy is the energy available as resources – such as the fuels burnt in power plants – before it has been transformed. This relates to the coal before it has been burned, the uranium, or the barrels of oil. Primary energy includes energy that the end user needs, in the form of electricity, transport and heating, plus inefficiencies and energy that is lost when raw resources are transformed into a usable form. You can read more on the different ways of measuring energy in our article.

L'introduction du livre

- Les machines à vapeur étaient largement utilisées en Angleterre
- Leur emploi dans le domaine de la navigation est un « art entièrement nouveau » et rapproche les nations



Les questions centrales du livre

Carnot conclut son introduction en énonçant des grandes questions:

- Existe-t-il une **limite à la performance** d'une machine à vapeur? (« perfectionnements sont susceptibles d'une extension indéfinie »)
- La vapeur d'eau est-elle le **meilleur fluide**? L'air atmosphérique ne présente-t-il pas des avantages?

(7)
limitée, ou si elle est sans bornes; si les perfectionnements possibles des machines à feu ont un terme assignable, terme que la nature des choses empêche de dépasser par quelque moyen que ce soit, ou si au contraire ces perfectionnements sont susceptibles d'une extension indéfinie.

L'on a aussi cherché long-temps, et l'on cherche encore aujourd'hui, s'il n'existerait pas des agens préférables à la vapeur d'eau pour développer la vapeur motrice du feu; si l'air atmosphérique, par exemple, ne présenterait pas, à cet égard, de grands avantages. Nous nous proposons de soumettre ici ces questions à un examen réfléchi.

La méthodologie

- Carnot veut proposer une théorie des machines à vapeur, comme il en existe pour les machines qui exploitent la force du vent, de l'eau ou animale (la théorie mécanique).
- Cette théorie devra être suffisamment générale

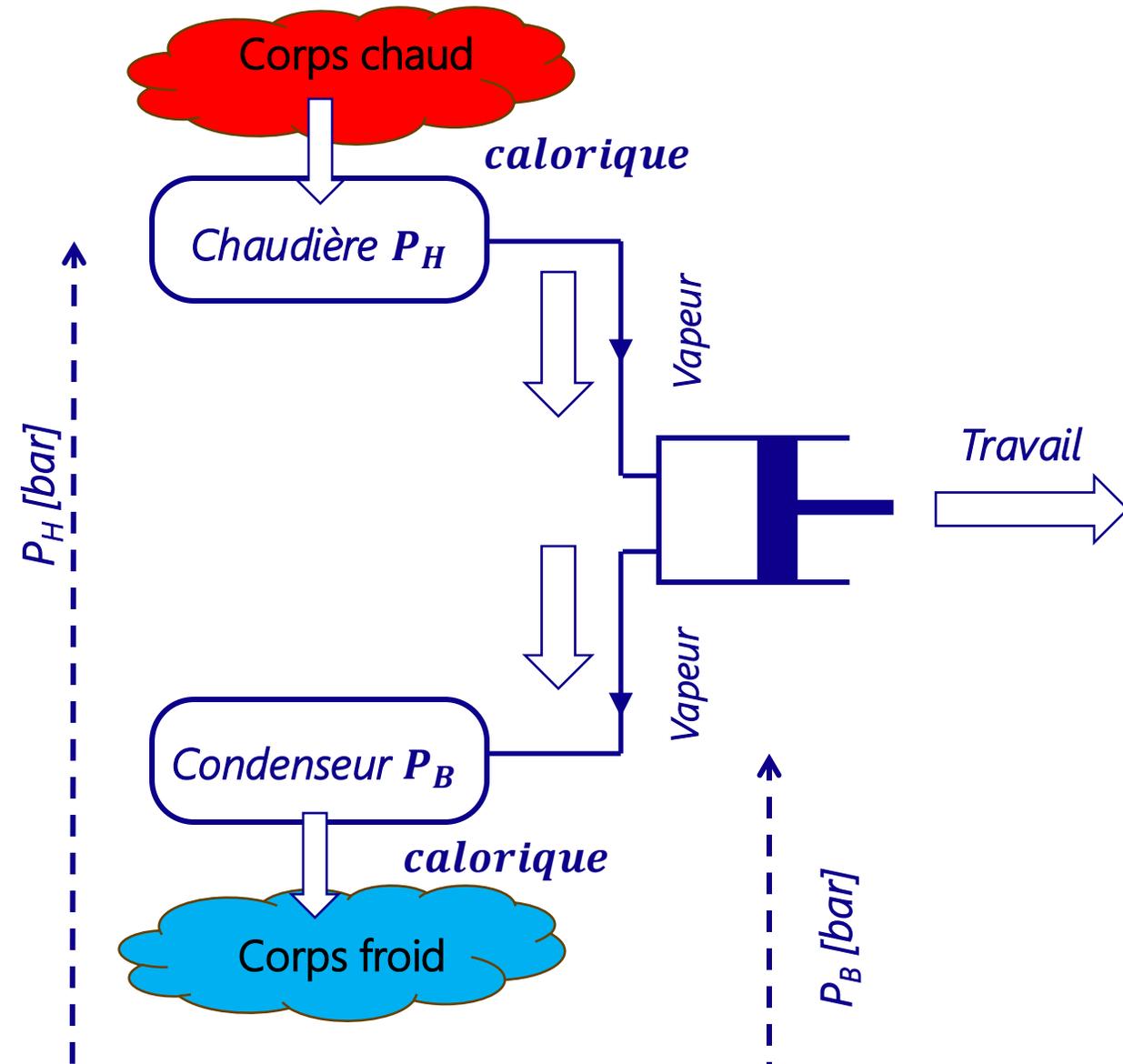
Les machines qui ne reçoivent pas leur mouvement de la chaleur, celles qui ont pour moteur la force des hommes ou des animaux, une chute d'eau, un courant d'air, etc., peuvent être étudiées jusque dans leurs moindres détails par la théorie mécanique. Tous les cas sont prévus, tous les mouvemens imaginables sont soumis à des principes généraux solidement établis et applicables en toute circonstance. C'est là le caractère d'une théorie complète. Une semblable théorie manque évidemment pour les machines à feu. On ne la possédera que lorsque les lois de la physique seront assez étendues, assez généralisées, pour faire

La théorie de Carnot exploite la théorie du calorique

- Théorie du calorique: proposée par **Lavoisier**, elle rencontre un succès dans les années 1770.
- Le calorique est **un fluide sans masse qui s'écoule du corps chaud vers corps froid**
- La conservation du calorique **transgresse la conservation de l'énergie** qui ne sera formulée que bien plus tard (1842-43 par Mayer et Joule)
- La théorie du calorique a commencé à s'estomper dans les années 1820, mais Carnot, éloigné des cercles académiques n'en était pas entièrement conscient et a continué à l'utiliser plus tard que les autres.

Les contributions

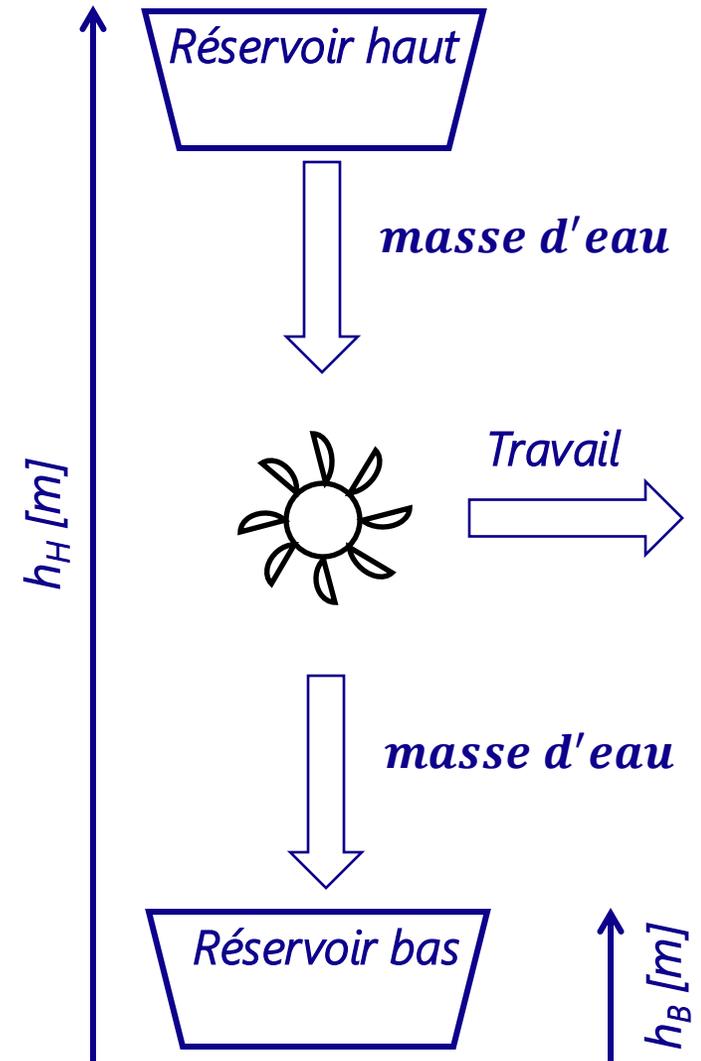
Contribution #1: le maximum de travail dépend de la différence de température et pas de pressions (très bonne intuition)



Les contributions

Carnot exploite l'analogie avec la roue hydraulique

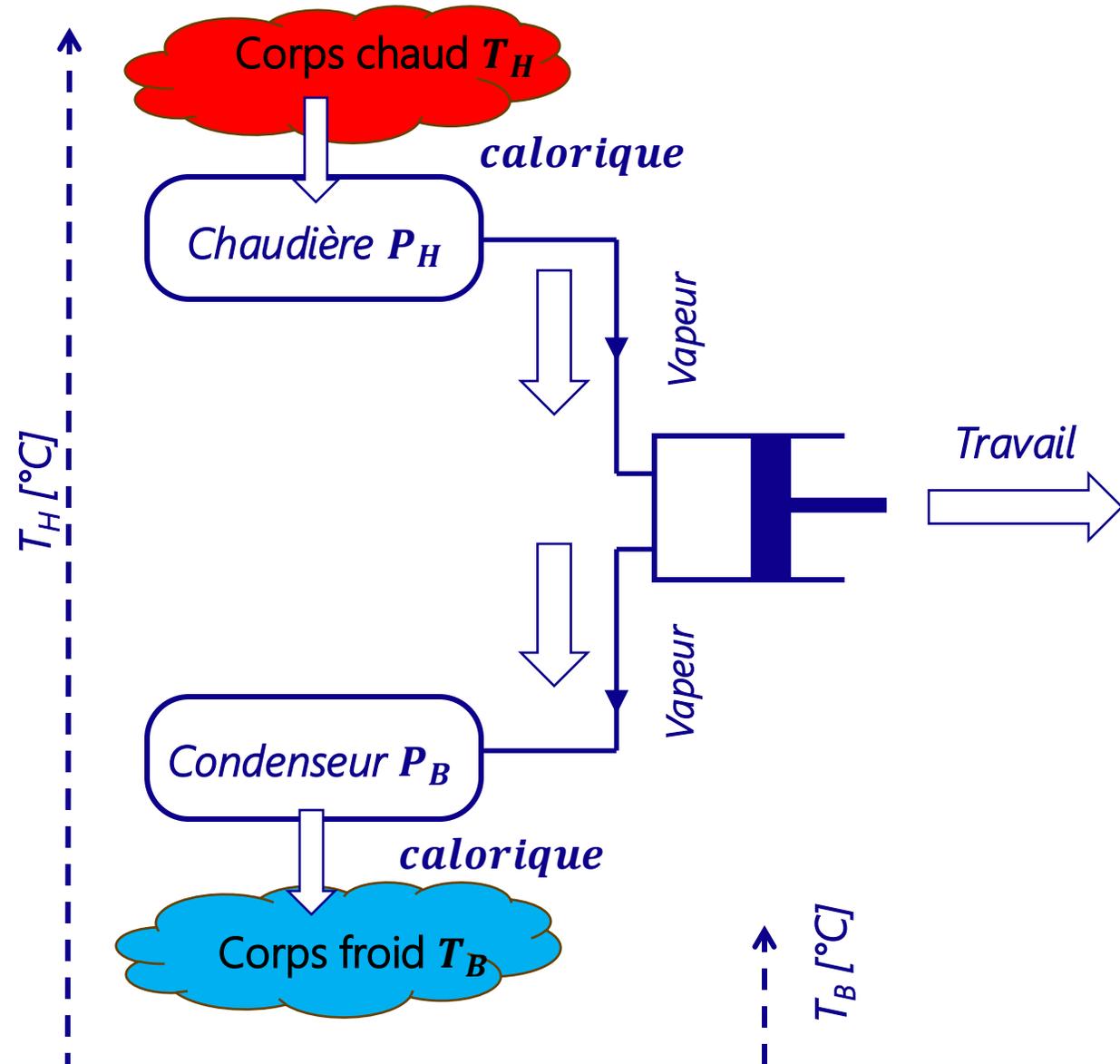
leur. La puissance motrice d'une chute d'eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employé, et de ce qu'on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet la hauteur de sa chute (r), c'est-à-dire de la différence de température des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique. Dans la chute d'eau, la puissance



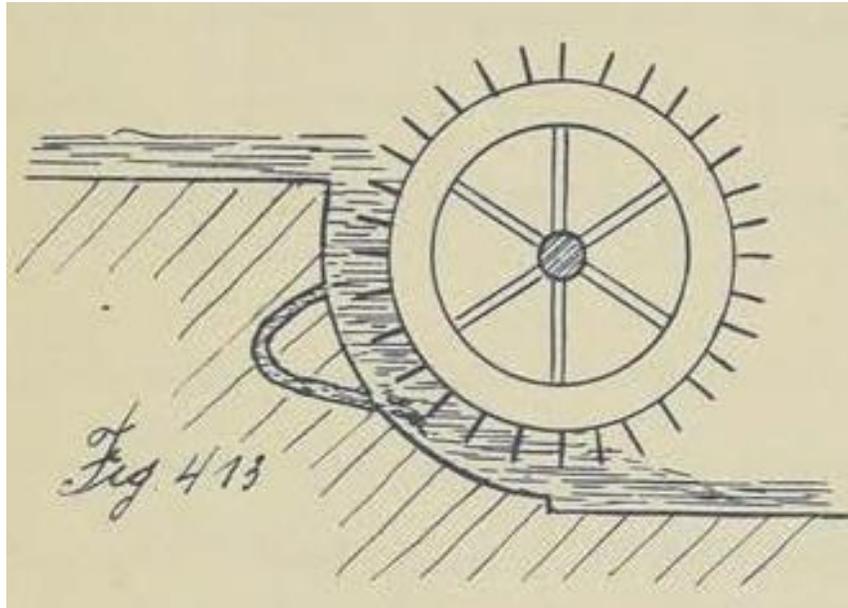
Les contributions

Il introduit la notion de hauteur de chute du calorique, i.e la différence entre la température du corps chaud et celle du corps froid

(1) La matière ici traitée étant tout à fait nouvelle, nous sommes forcés d'employer des expressions encore inusitées et qui n'ont peut-être pas toute la clarté désirable.



Les contributions



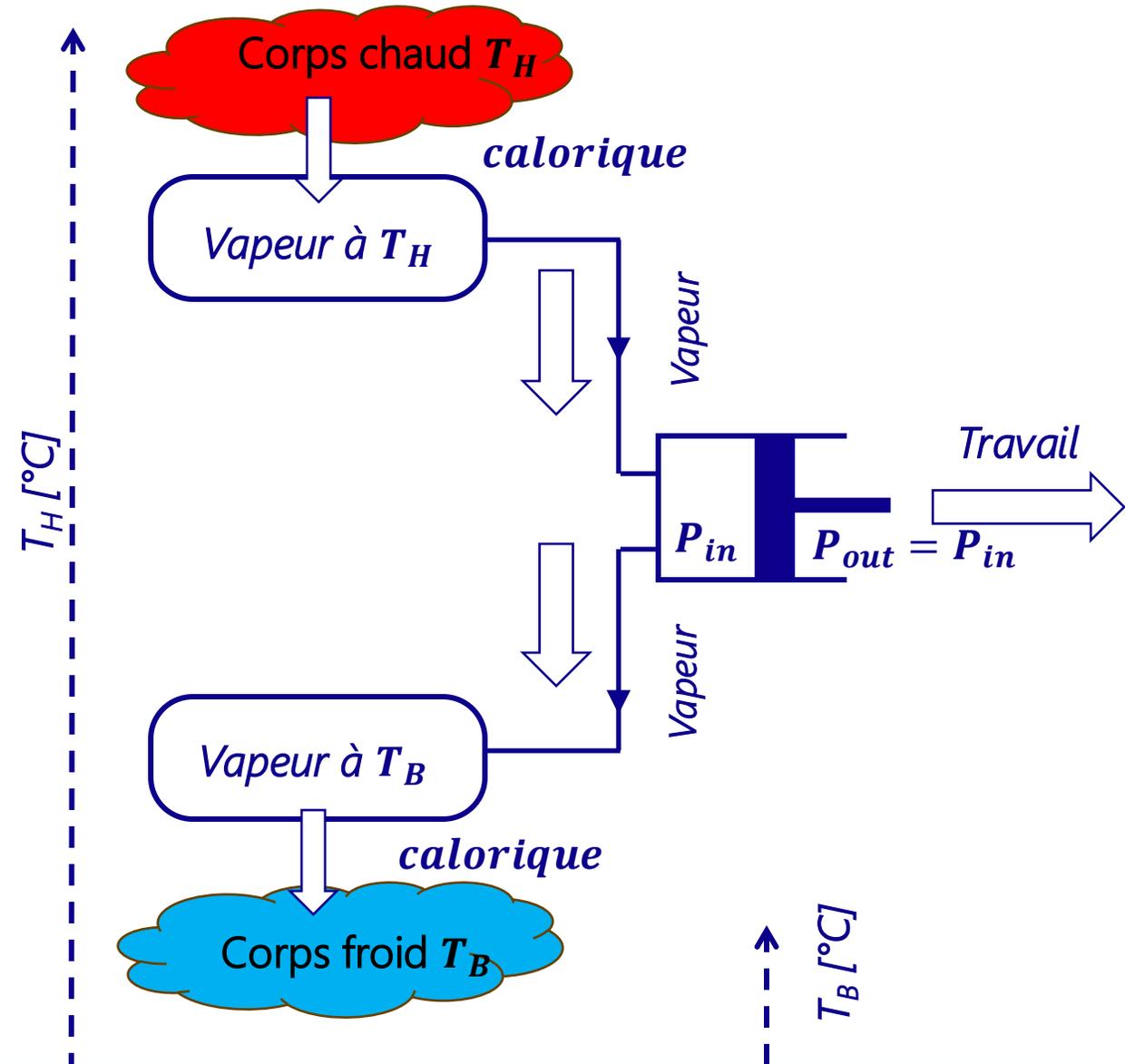
L'analogie hydraulique est restée très longtemps exploitée dans l'enseignement liégeois

Pertes par échange thermique entre la vapeur et les parois : analogie avec le moteur hydraulique. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, Mécanique Appliquée 2. ULiège Library, MS4336, p. 391 (1906)

Les contributions

Contribution #2: Le moteur réversible est imaginé

- Pas de différence de température associée au transfert de chaleur (idéal mais impossible)
 - Pressions de part et d'autre du piston égales
- => Fonctionnement de la machine infiniment lent
- Pas de perte de calorique vers l'environnement

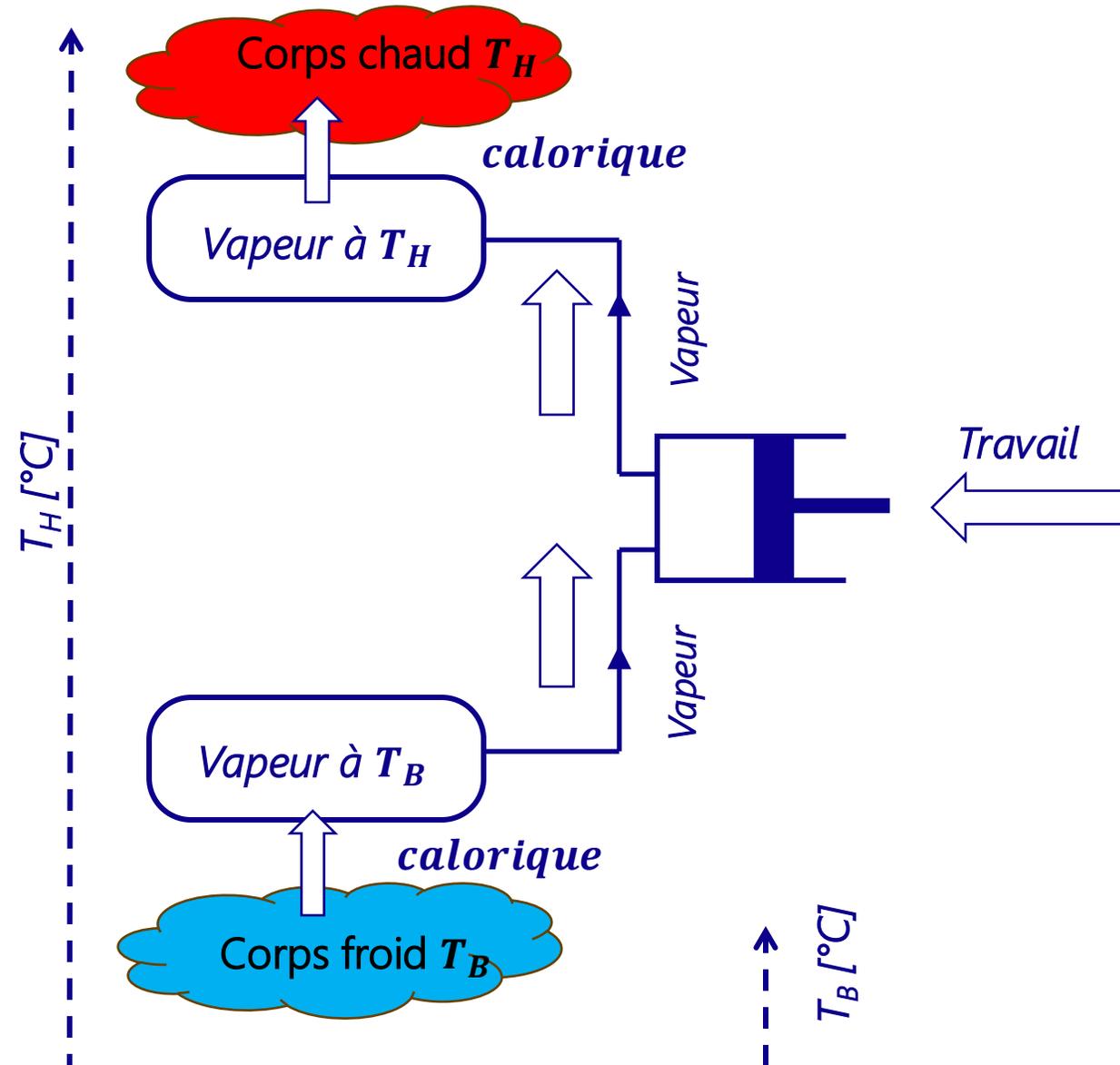


Les contributions

Contribution #2: Le moteur réversible est imaginé

=> Carnot anticipe le fonctionnement de la pompe à chaleur

volume occasionés par la chaleur : *Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice. Réciproquement partout où l'on peut consommer de cette puissance, il est possible de faire naître une différence de température, il est possible d'occasioner une rupture d'équilibre dans le calorique. La percussion, le frottement des*

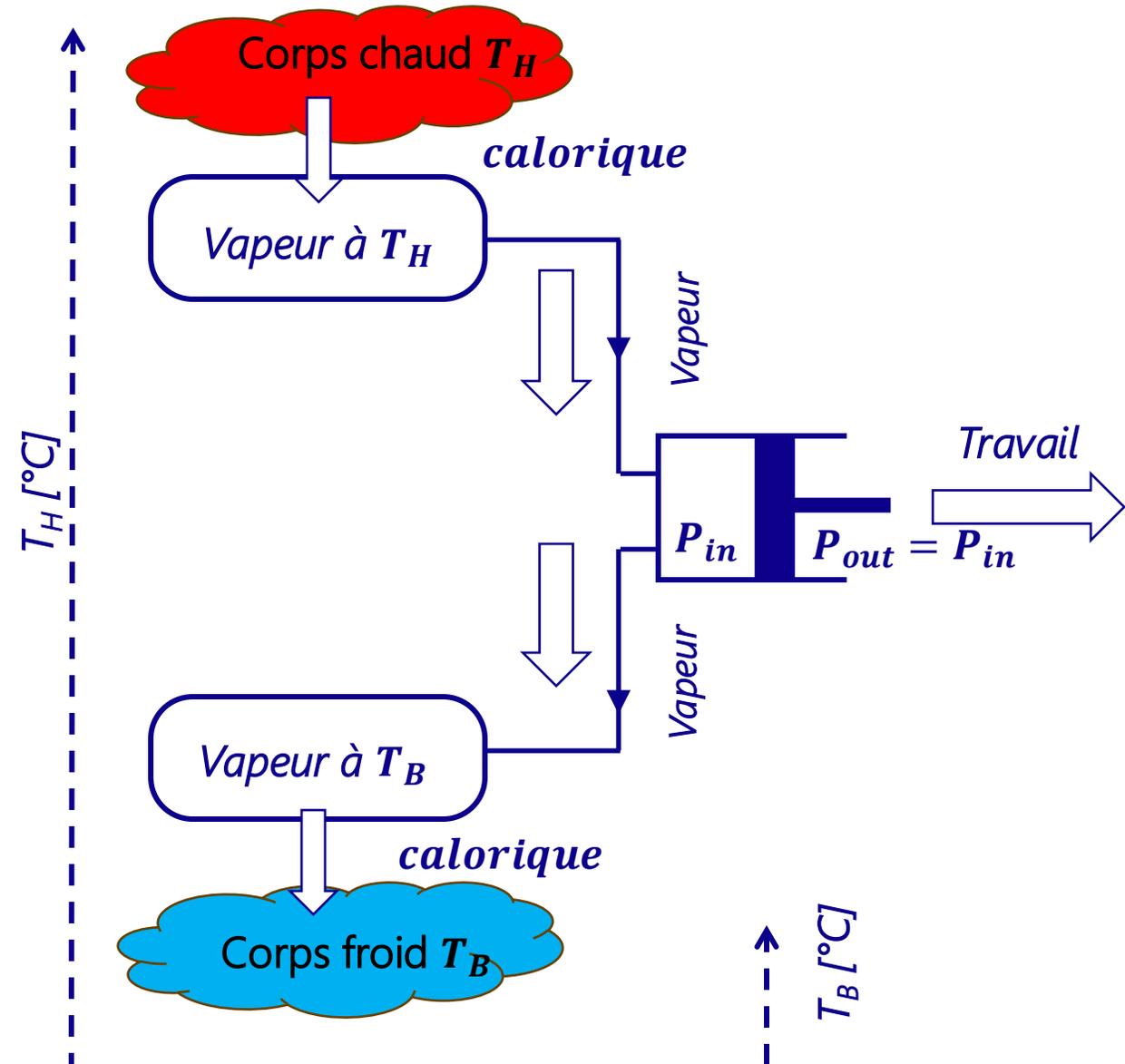


Les contributions

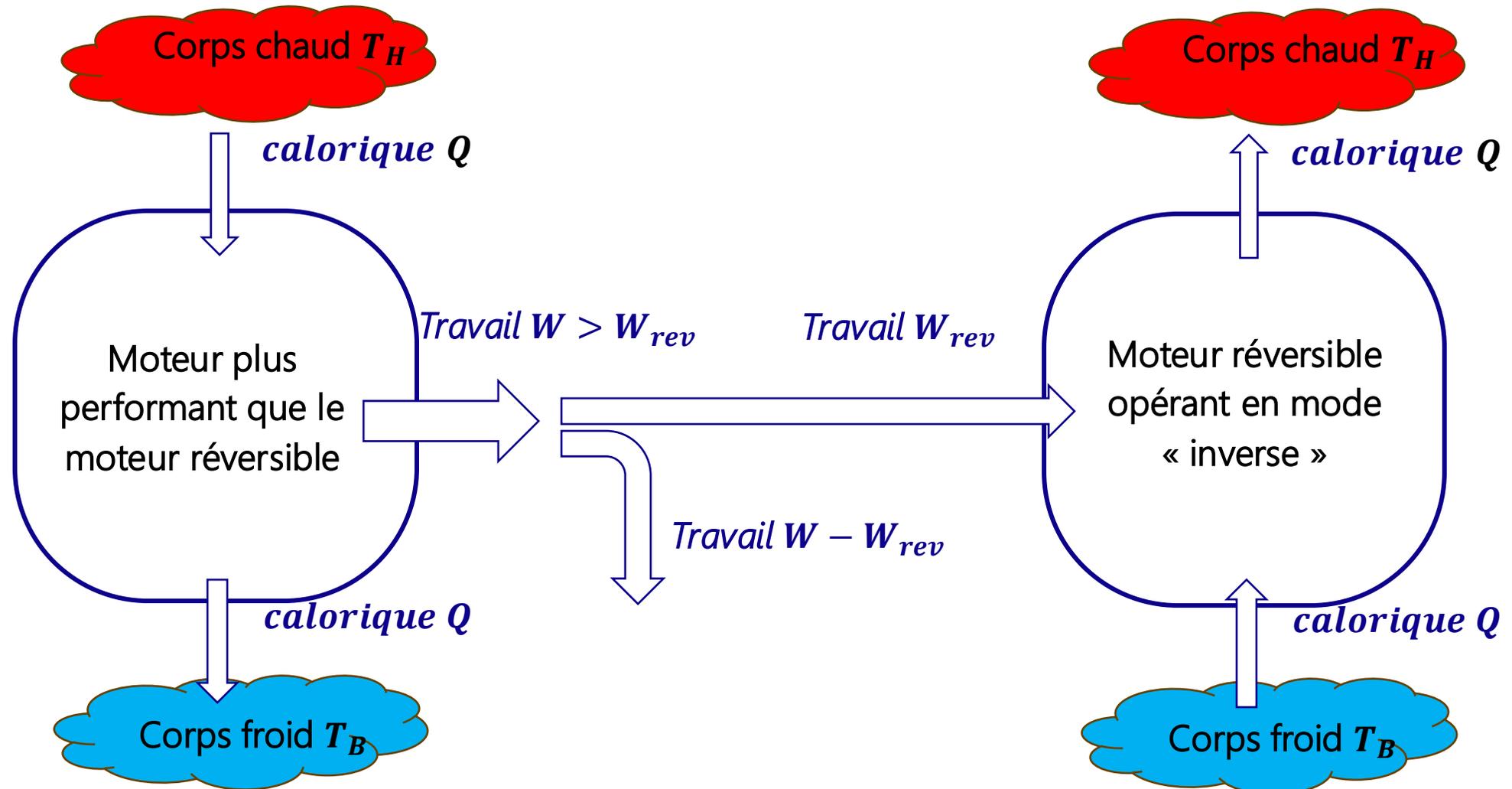
Contribution #2: Le moteur réversible est imaginé

- **Théorème 1:**

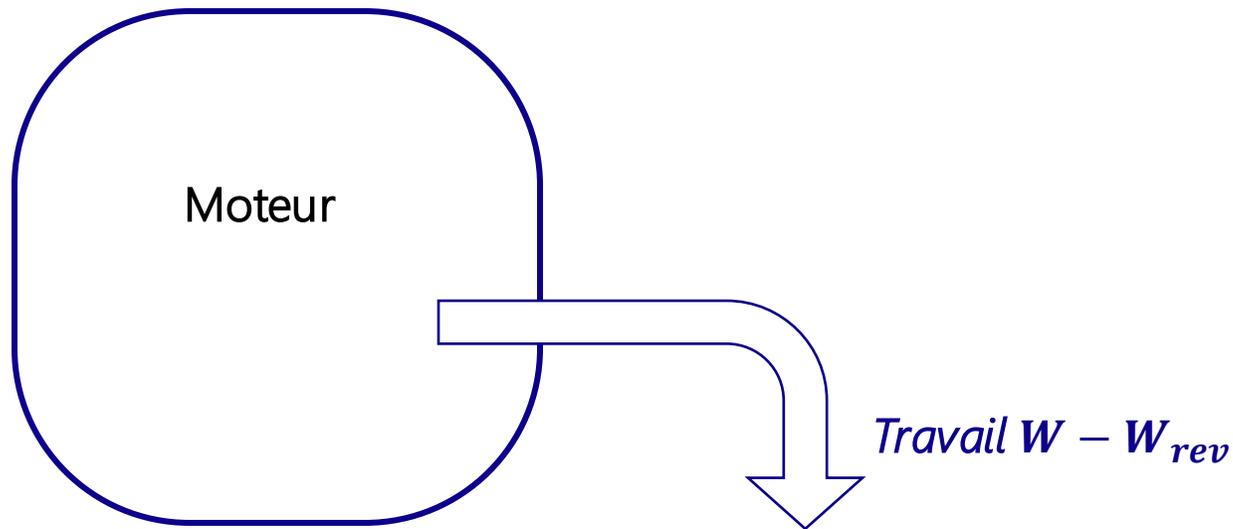
« On doit donc conclure que le maximum de puissance motrice résultant de l'emploi de la vapeur est aussi le maximum de puissance motrice réalisable par quelque moyen que ce soit. » (p.22)



Les contributions: démonstration par l'absurde du théorème 1



Les contributions: démonstration par l'absurde du théorème 1



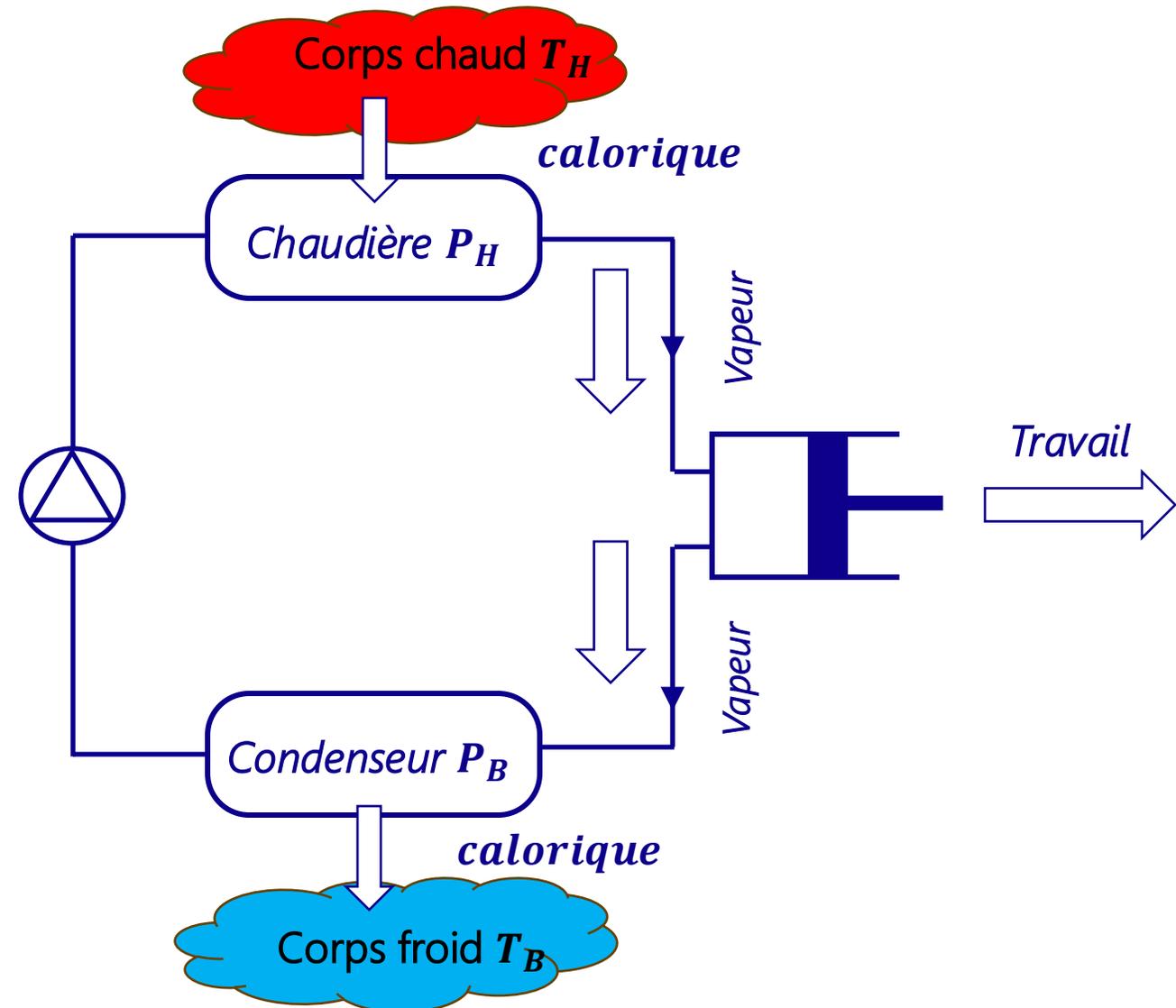
Si une machine était plus performante qu'une machine réversible, alors le mouvement perpétuel serait réalisé.

(21)
sure de recommencer une opération entièrement semblable à la première et ainsi de suite: ce serait là, non seulement le mouvement perpétuel, mais une création indéfinie de force motrice sans consommation ni de calorique ni de quelque autre agent que ce soit. Une semblable création est tout-à-fait contraire aux idées reçues jusqu'à présent, aux lois de la mécanique et de la saine physique; elle est inadmissible (1). On doit donc conclure que *le*

Les contributions

Contribution #3: l'ensemble chaudière-expandeur-condenseur-pompe doit être considéré vs expandeur seul

=> La notion de **cycle** est introduite



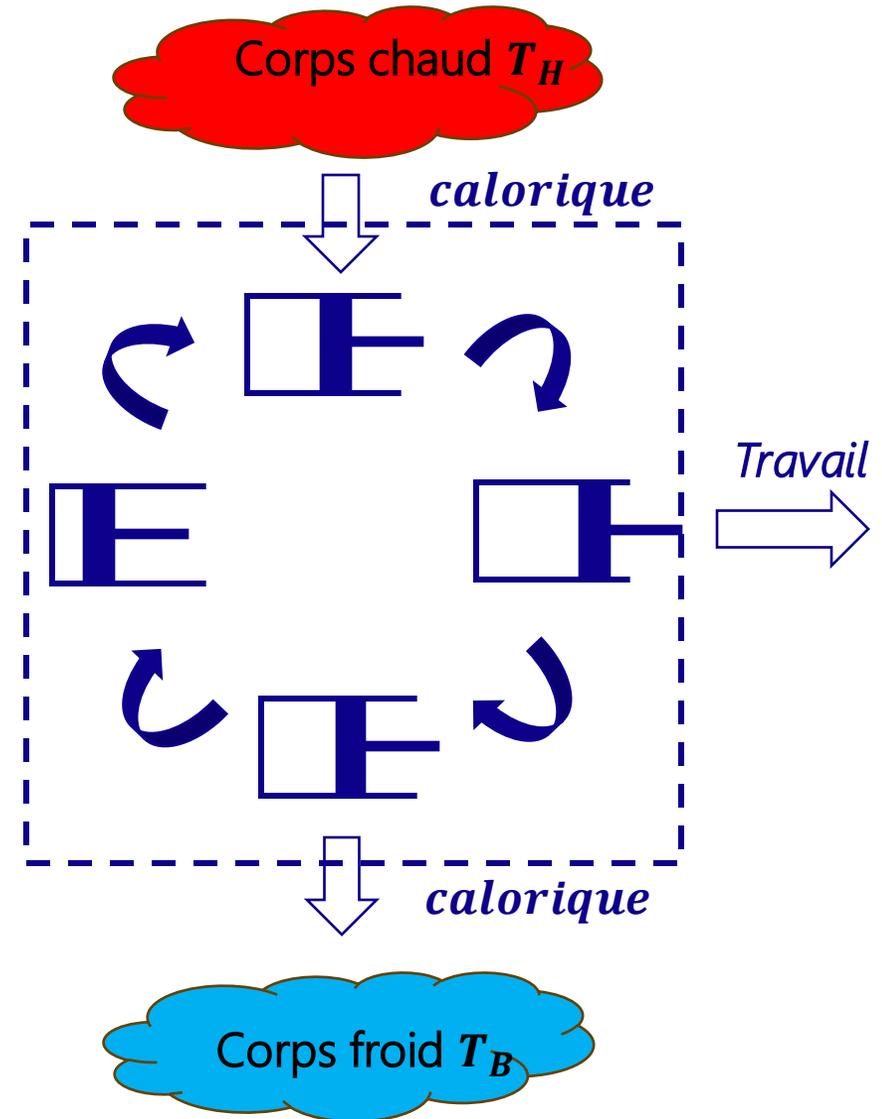
Les contributions

Contribution #4: la performance maximale d'une machine à feu est indépendante de la nature du fluide (et des aspects constructifs)

- Théorème 2:
« La puissance motrice de la chaleur est indépendante des agents [sic] mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique. » (p.28)

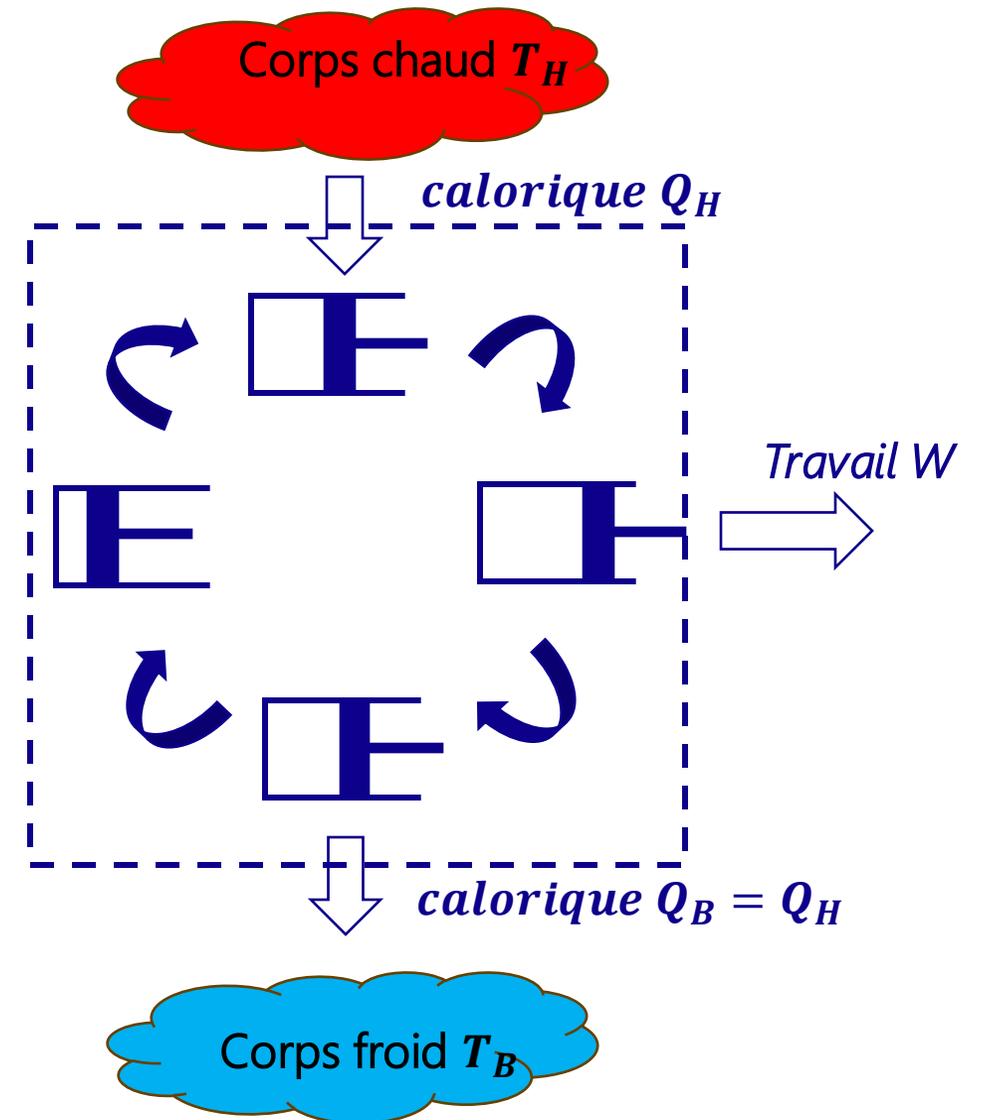
$$\eta = 1 - T_B/T_H$$

(cette formule, le « rendement de Carnot », apparaît dans les années 1850)



Les contributions: l'erreur (largement pardonnée)

La conservation du calorique ($Q_H = Q_B$)
transgresse la conservation de l'énergie
($Q_B = Q_H - W$)



Agenda

- Introduction
- L'auteur
- Le contexte de l'écriture
- La forme du Livre
- Le fond du livre
- **La réception du livre et sa redécouverte**
- La diffusion des idées (très fécondes) du livre
 - L'élaboration de la thermodynamique classique
 - La thermodynamique des processus irréversibles
- Conclusions

La réception du livre

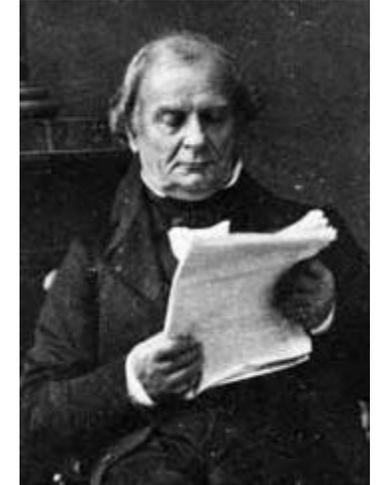
- Le livre est présenté à l'Académie des sciences en juin 1824. Il reçoit un accueil favorable.
- Le livre ne rencontrera pas beaucoup de succès
 - ✓ Pas assez pratique pour les ingénieurs (mentionné dans peu de brevets)
 - ✓ Ne rencontre pas les standards de l'écriture scientifique
- Carnot meurt en 1832, ses papiers sont brûlés (épidémie de Choléra à Paris)
- Son frère Hippolyte, à la demande de son neveu aussi appelé Sadi, a finalement rendues publiques des notes de Sadi Carnot en 1878



Sadi Carnot à la fin de sa courte vie (vers 1830)
Source: Académie François Bourdon, Le Creusot

La saga débute: Clapeyron et le diagramme pression-volume

- Emile Clapeyron découvre le livre et le fait connaître dans son Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur (1834)
- Il introduit davantage de développements mathématiques et le diagramme pression-volume.

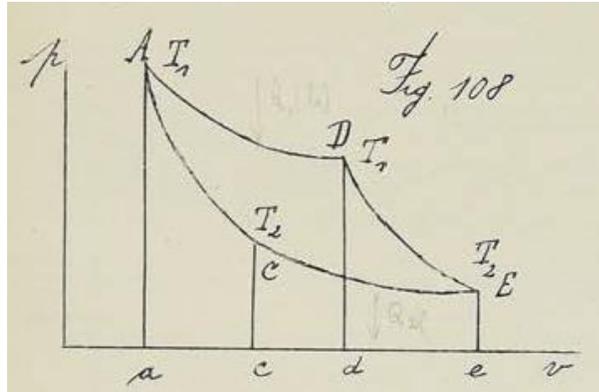


Je citerai enfin parmi les travaux qui ont paru sur la théorie de la chaleur, un ouvrage de M. S. Carnot, publié en 1824, sous le titre de *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. L'idée qui sert de base à ses recherches me paraît féconde et incontestable, ses démonstrations sont fondées sur l'absurdité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

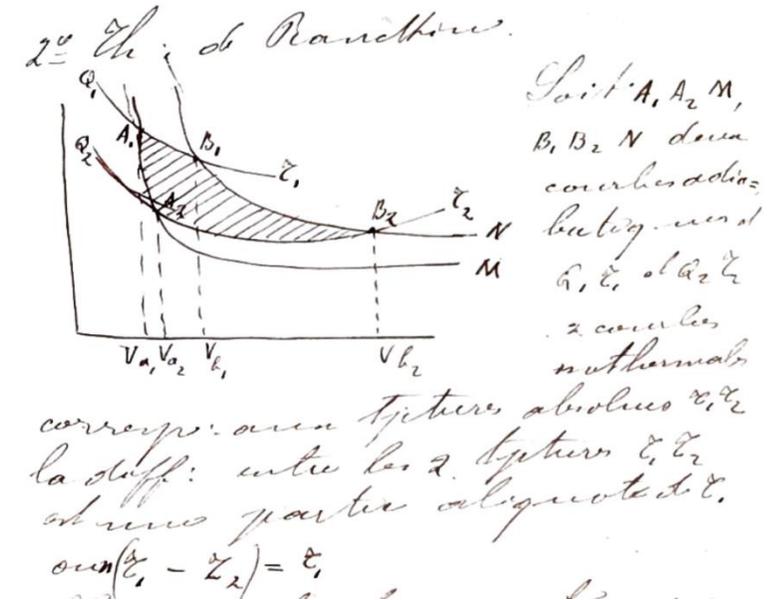
Je crois qu'il est de quelque intérêt de reprendre cette théorie; M. S. Carnot, évitant l'emploi de l'analyse mathématique, arrive par une série de raisonnemens délicats et difficiles à saisir, à des résultats qui se déduisent sans peine d'une loi plus générale; que je vais chercher à établir. Mais avant d'entrer en matière, il est utile de revenir sur l'axiome fondamental qui sert de base aux recherches de M. Carnot, et qui sera aussi mon point de départ.

MÉMOIRE
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE DE LA CHALEUR,
PAR E. CLAPEYRON,
INGÉNIEUR DES MINES.

Clapeyron et le diagramme pression-volume

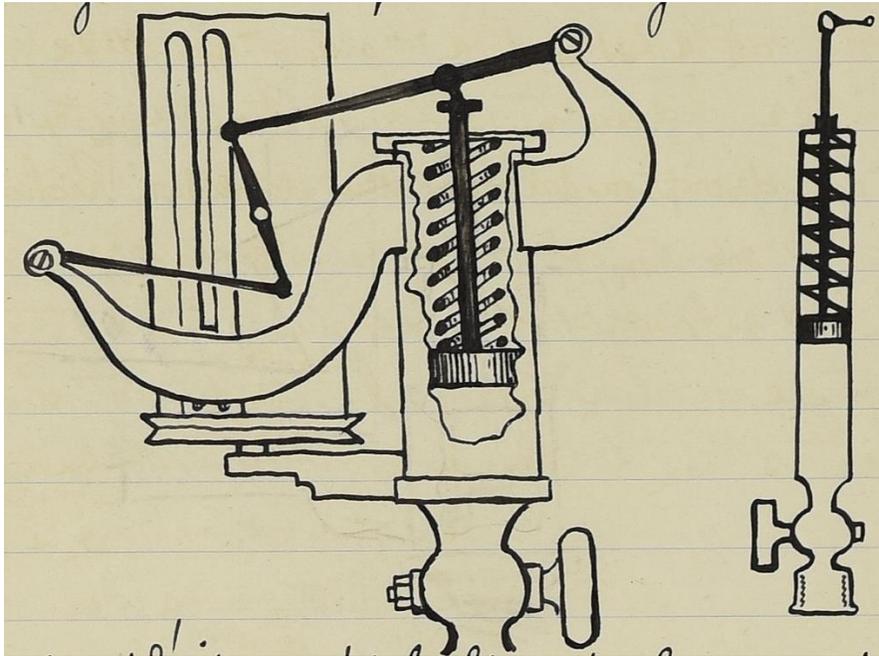


Représentation du cycle de Carnot. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, Physique Industrielle. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 177.



Représentation graphique du théorème de Rankine. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, Mécanique Appliquée, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 645

Clapeyron et le diagramme pression-volume



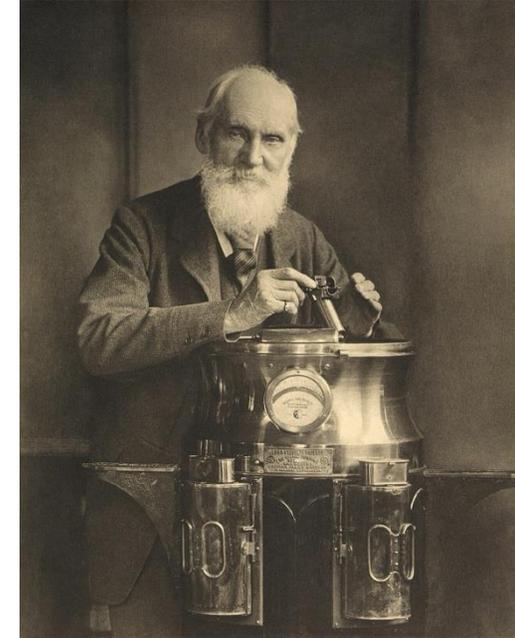
Représentation schématique d'un indicateur Richards (gauche).
Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST,
Mécanique Appliquée, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.



Indicateur de pression de type Garnier (largeur du papier : 10,3 mm).
Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège.
Photos par l'auteur (Août 2023 et Novembre 2021).

A la recherche du livre dans Paris par Thomson

- William Thomson (Lord Kelvin) découvre le livre de Clapeyron
- Il cherche le livre de Carnot chez les libraires parisiens
- Il écrit deux livres basés sur les travaux de Carnot:
 - En 1848, (en ayant uniquement lu le livre de Clapeyron... il le trouvera peu de temps après): *On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and calculated from Regnault's Observations*
 - En 1849 : *An Account of Carnot's Theory of the Motive Power of Heat* (livre dans lequel il propose Thermo-dynamique)

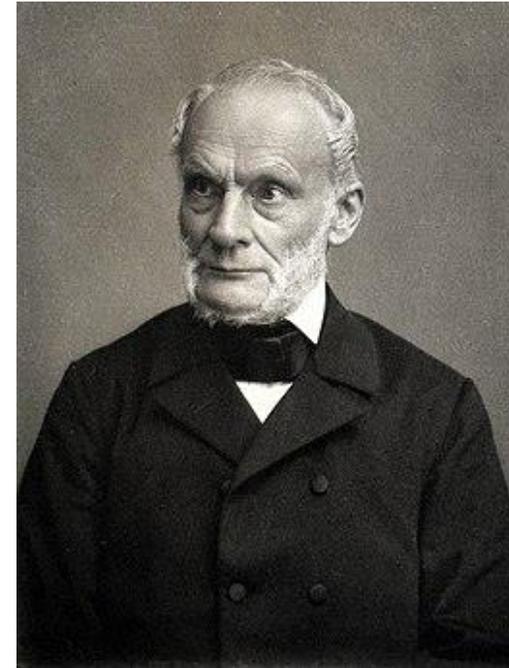


Thomson reconnaîtra *Réflexions* comme une des grandes choses faites au monde (« one the greatest scientific works ever written » (Translation of Reflections

by Robert Fox in 1986))

Clausius et l'entropie

- En 1850, sans avoir lu le livre de Carnot, Clausius publie un premier mémoire inspiré par les travaux de Thomson: *On the Motive Power of Heat*
- Il écrira de nombreux autres jusqu'en 1865
- Dans un mémoire de 1865, il introduit une nouvelle variable thermodynamique: l'**entropie** (du grec tropé « transformation »). Cette nouvelle variable permet d'écrire le second principe sous forme d'équation.
- Clausius définira le canevas de la thermodynamique classique avec ses deux principes:



- Conservation de l'énergie
- Production d'entropie

$$\Delta E = Q_{in} - Q_{out} + W_{in} - W_{out} + \sum m_{in}h_{in} - \sum m_{out}h_{out}$$

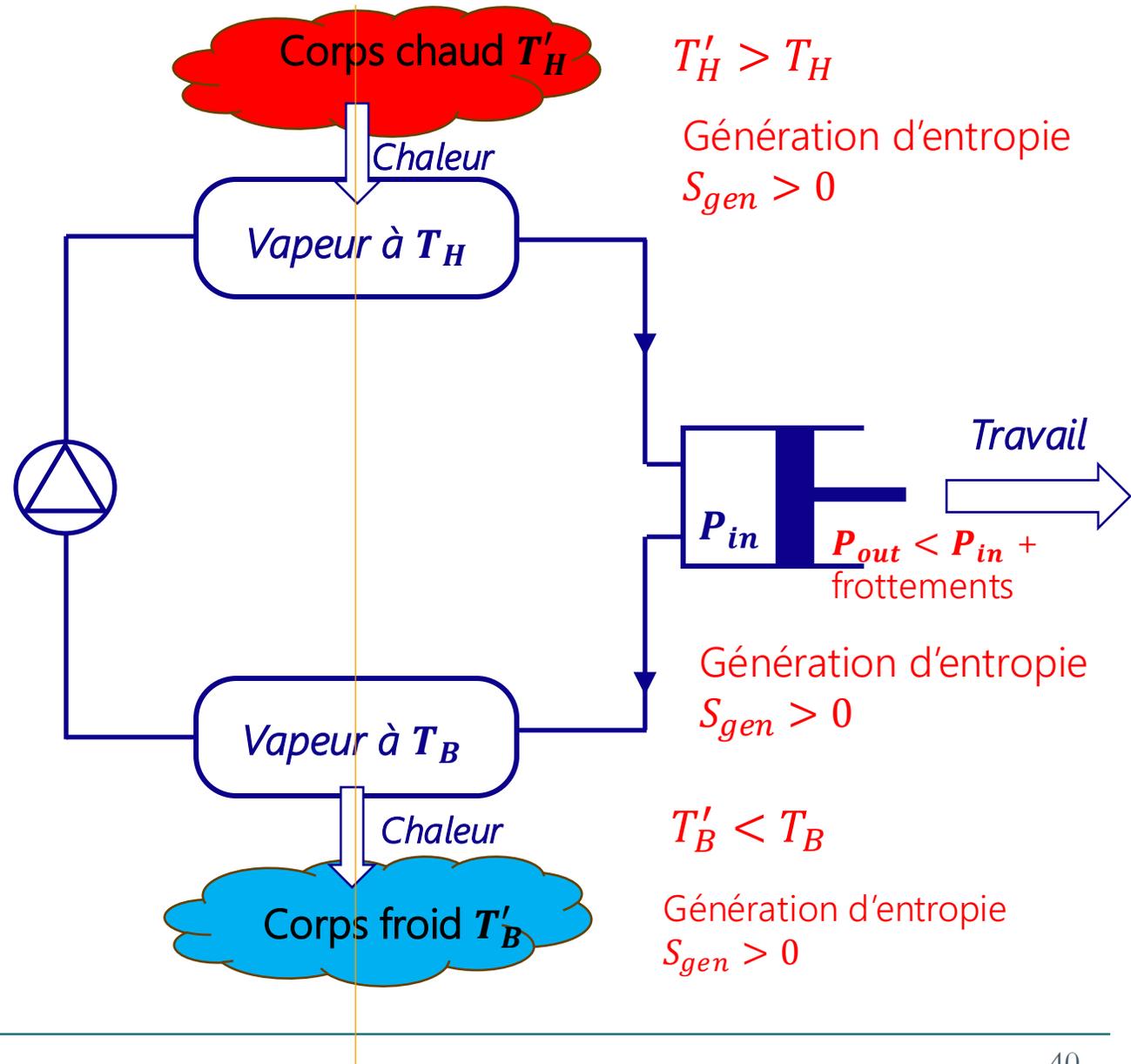
$$\Delta S = \underbrace{\sum Q_k/T_k + \sum m_{in}s_{in} - \sum m_{out}s_{out}}_{\text{Transfert d'entropie}} + \underbrace{S_{gen}}_{\text{Production d'entropie}}$$

Transfert d'entropie

Production d'entropie
(> 0 si irréversible et = 0 si réversible)

Clausius et l'entropie

- Revenons au moteur de Carnot
- Au cours d'un processus irréversible (i.e. hors équilibre), il y a création d'entropie
- La création S_{gen} au cours d'un processus devient un indicateur de la « qualité » d'un processus.



Agenda

- Introduction
- L'auteur
- Le contexte de l'écriture
- La forme du Livre
- Le fond du livre
- La réception du livre et sa redécouverte
- **La diffusion des idées (très fécondes) du livre**
 - L'élaboration de la thermodynamique classique
 - La thermodynamique des processus irréversibles
- Conclusions

La thermodynamique classique

Différents énoncés du 2e principe:

La chaleur ne s'écoule pas spontanément d'un corps froid vers un corps chaud

Une machine ne peut pas être plus performante qu'une machine réversible fonctionnant entre deux sources à des t° données

La performance maximale d'une machine ne dépend pas du fluide ni de ses aspects constructifs, mais uniquement des niveaux de température de la source chaude et du puits froid

Au cours d'une évolution, la création d'entropie est positive ou nulle: $S_{gen} \geq 0$

La thermodynamique classique: la flèche du temps

Dans une évolution **réelle** (avec irréversibilités, notamment due à l'absence d'infiniment lent), il y a **création d'entropie**: $S_{gen} > 0$

L'entropie de l'univers ne fait qu'augmenter.. La création d'entropie permet de distinguer le la passé du futur.

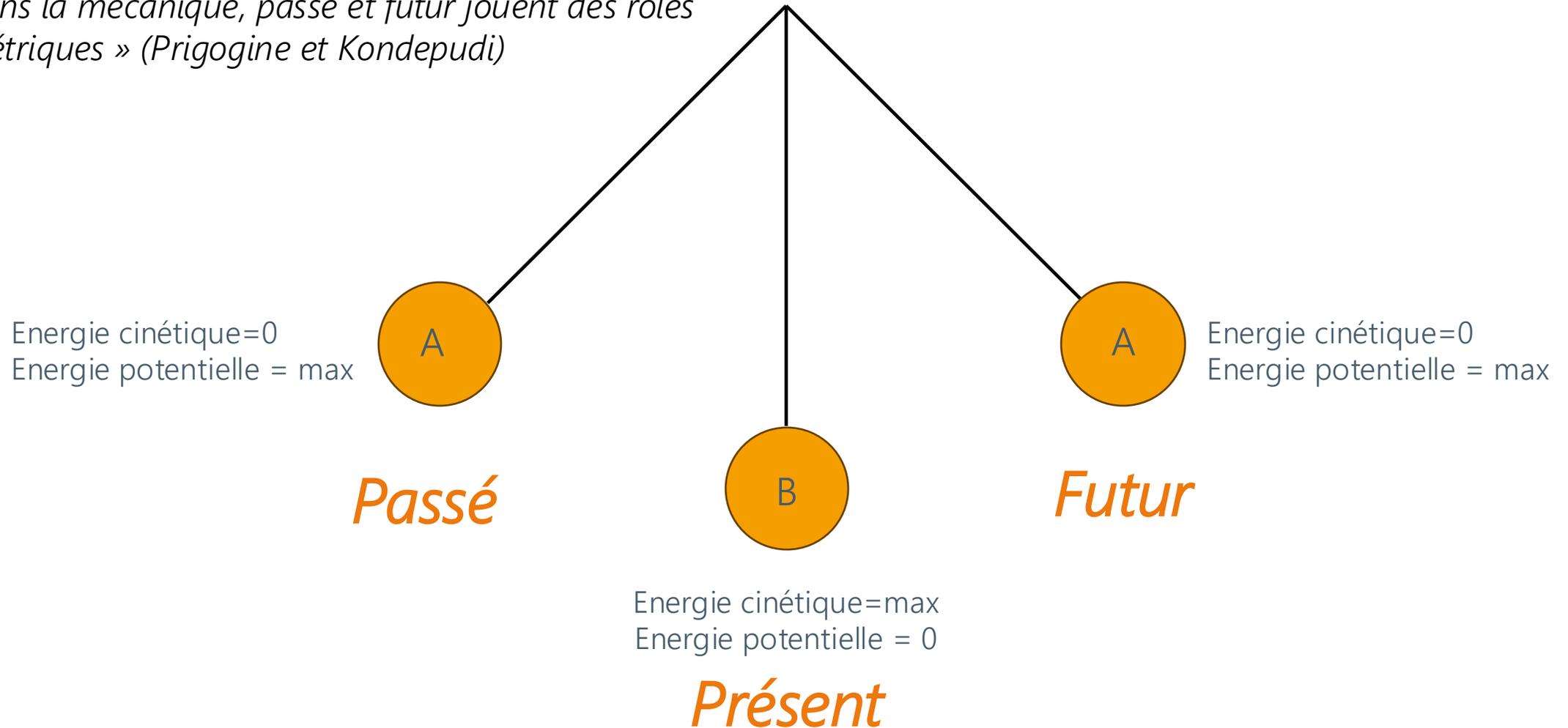
Passé

Futur



La thermodynamique classique: la flèche du temps

« Dans la mécanique, passé et futur jouent des rôles symétriques » (Prigogine et Kondepudi)



La thermodynamique statistique

Boltzmann a cherché à interpréter l'entropie statistiquement (à l'échelle microscopique)

Il cherche à réconcilier la réversibilité de la mécanique classique avec l'irréversibilité thermodynamique (Prigogine et Kondepudi, 1999)



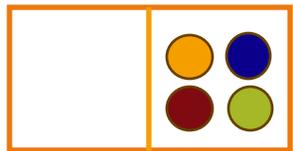
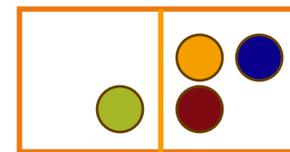
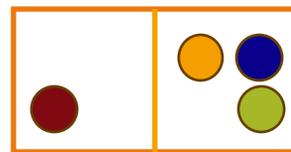
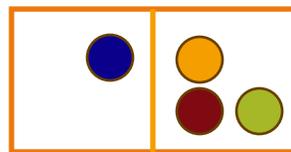
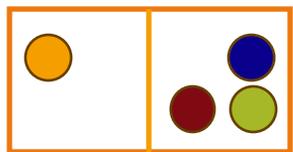
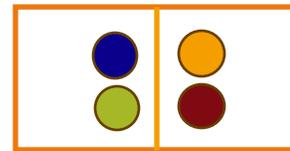
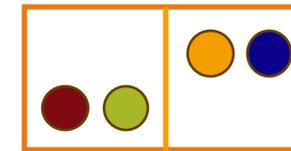
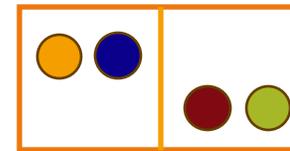
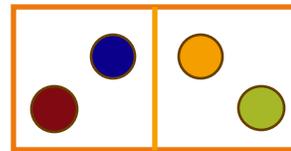
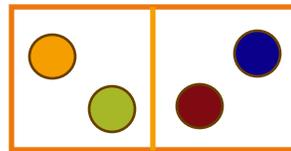
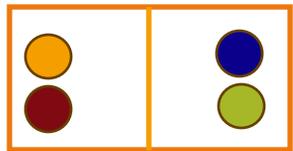
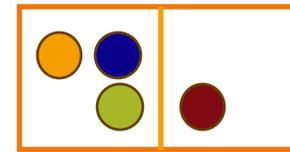
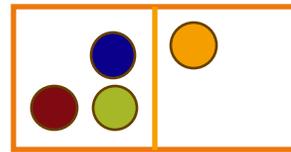
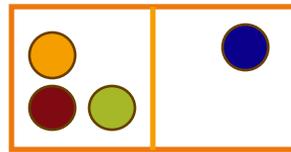
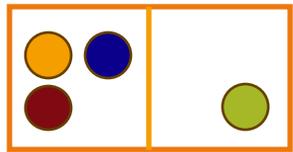
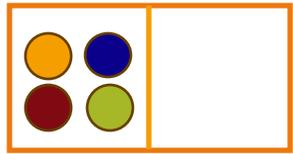
$$S = k \log W$$

W est le nombre d'états microscopique possibles (nombre de complexations) pour un même état macroscopique (donc une même entropie)

Tombe de Boltzmann au cimetière central de Vienne. buste. CC BY-SA 3.0

La thermodynamique statistique

Avoir le même nombre de billes dans les deux cases est l'état **macroscopique** qui correspond au plus grand nombre d'états **microscopiques** ($W=6$) => état macroscopique le plus probable



Les états caractérisés par des valeurs plus grandes de W sont plus probables L'évolution vers des états plus probables augmentent S .

La thermodynamique des processus irréversibles

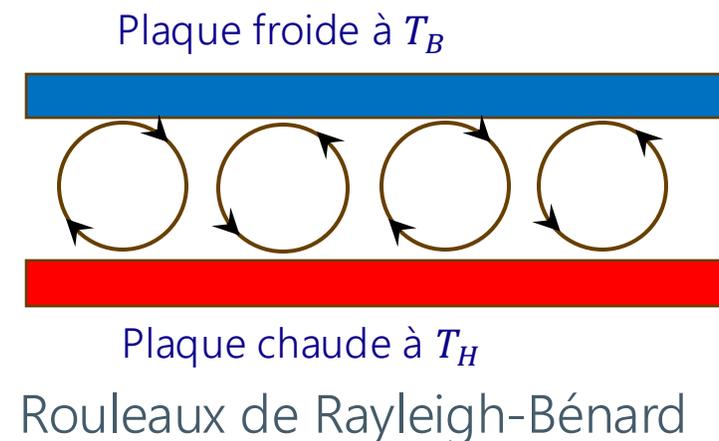
- Beaucoup de phénomènes sont irréversibles: transfert de chaleur, mouvement d'un piston sous une différence de pression, courant électrique sous l'effet d'une différence de potentiel, écoulement dans un milieu poreux sous une différence de pression...
- L'école bruxelloise propose (après la 1ère guerre mondiale) d'écrire le taux de production d'entropie \dot{S}_{gen} associé à ces phénomènes sous la forme d'un **produit d'une force et d'un flux**. Par exemple, dans le cas d'un transfert de chaleur (Dumas, 2023).

$$\dot{S}_{gen} = \dot{Q} \times \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_H} \right) > 0$$

- Cette approche se généralise à différents phénomènes physiques (courant électrique...)
- A l'équilibre: pas de force => flux est nul

La thermodynamique des processus irréversibles

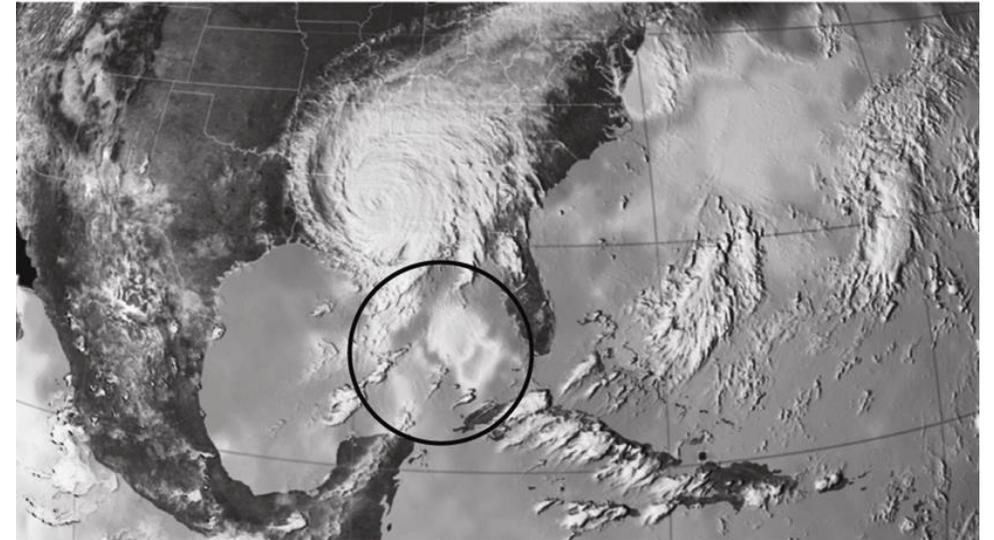
- A **proximité de l'équilibre** (forces sont faibles), on peut simplifier cette approche (on linéarise l'expression du flux en fonction des forces). Dans le cas du transfert de chaleur, on retrouve la loi de conduction de la chaleur de Fourier (1822): cette loi est donc bien une expression du second principe et le "reflet de la flèche du temps" (Dumas, 2023)
- **Loin de l'équilibre**, un système peut évoluer vers une structure ordonnée, stationnaire. Cette structure crée énormément d'entropie et existe si on lui communique de l'énergie et de la matière = **Structure dissipative**



La thermodynamique des processus irréversibles

- A **proximité de l'équilibre**: la création d'entropie amène le système à l'équilibre ($\dot{S}_{gen} = 0$)
- **Loin de l'équilibre**: la création d'entropie peut donner lieu à des structure auto-organisées: par exemple, les êtres vivants ("des systèmes ordonnés à la complexité structurante" (Dumas, 2023)), les ouragans, la société humaine,...

"The destruction of order prevails in the neighborhood of equilibrium. Creation of order may occur far from equilibrium provided the system obeys to nonlinear laws of a certain type." (Nicolis and Prigogine, 1977)



Refroidissement de l'océan au passage de l'ouragan Katrina en 2005: l'océan alimente l'ouragan en énergie.
Source: Tiezzi et al., Dissipative structures in nature and human systems, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 114, 2008

Conclusions

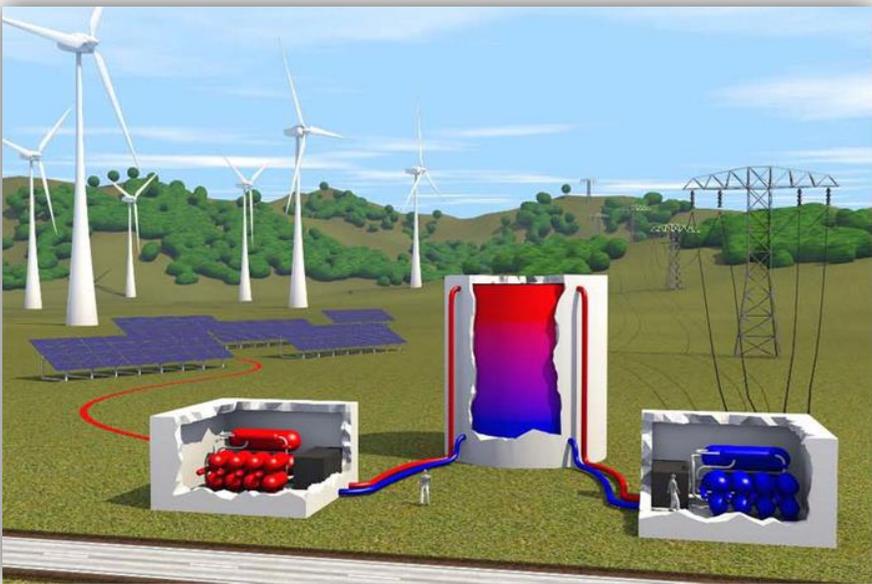
La thermodynamique naquit donc sur fond d'un intérêt plus pratique, lié à la puissance motrice du feu. Avec le temps, elle évolua, et développa une description générale des transformations entre les états de la matière – le mouvement engendré par la chaleur devenant ainsi un cas particulier d'application de ces transformations (Prigogine et Kondepudi, 1999)

Conclusions: Quel est l'héritage de Carnot pour les ingénieurs?

- Les niveaux de **température** et les "pincements" de température restent des variables clefs dans l'optimisation des systèmes thermiques.
- Il n'existe pas de meilleur **fluide**, mais aucun fluide n'est parfait (d'autres critères techniques, économiques et environnementaux doivent être pris en compte).
- La "machine décrivant les opérations dans l'ordre inverse" (**la pompe à chaleur**) doit jouer un rôle majeur dans la décarbonation du chauffage (habitat et industrie).

Conclusions: Quel est l'héritage de Carnot pour les ingénieurs?

- La "réversibilité" de la machine a fait germer l'idée d'un stockage d'électricité original: "la batterie de Carnot"

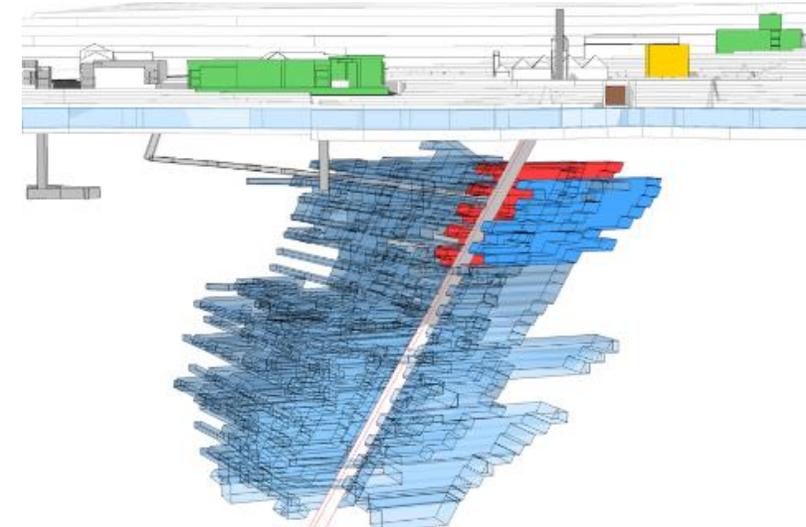


Principe d'une batterie de Carnot



Prototype de batterie de Carnot de 10 kW à l'ULiege

Projet de développement d'une batterie de Carnot utilisant de la géothermie minière



Merci pour votre attention!

Références

- BERTRAND, Gilles, PUGNET, Jean-Marc, 2023 & 2024. *Les bicentennaires CARNOT, C'est aussi au Creusot! Des savants d'hier pour imaginer demain*, Livret de l'Exposition Carnot. Pavillon de l'Industrie et Académie François Bourdon. Exposition du 10 avril à fin octobre 2024.
- CHEVRIER, Joël, *Sadi Carnot face à la fin de la civilisation thermo-industrielle*, Le Creusot, 2024.
- DUMAS, Jean-Pierre, *Thermodynamique: Cours, exercices et problèmes corrigés*, de boeck, 2023.