

Sadi Carnot

« Vers la
maîtrise de
l'énergie... »

Livret éducatif de l'exposition

Table des matières

Le mot de Madame la Rectrice	3
Le CCSTI	4
Dans une famille de Nolay, un grand physicien : Sadi Carnot	5
Nolay, il y a 200 ans	7
En Europe dans les villes jumelées avec Nolay à la même époque	8
200 ans d'énergie à Nolay	9
Sadi Carnot : l'homme de la Science	11
Sadi Carnot à l'École Polytechnique	13
Les professeurs de Sadi à l'École Polytechnique	14
À l'École Polytechnique : quelques contemporains de Sadi Carnot	16
Le temps des machines	17
Température et chaleur	18
«L'ouvrage fondateur»	19
L'énergie... c'est quoi ?	20
1 ^{ère} loi -> La conservation de l'énergie	21
2 ^{ème} loi -> Dissipation de l'énergie	22
Niépce invente le Pyrèolophore	23
La machine à vapeur	24
Le moteur à explosion	26
Chauffer et refroidir	28
La vapeur, encore et toujours !	30
S'éloigner de l'équilibre : transmettre la chaleur	31
S'éloigner de l'équilibre : Chimie : Rythmes et formes	32
Des moteurs thermiques aux structures dissipatives	33
Fondation Carnot	34
Autour de Sadi Carnot, de la chaleur à la thermodynamique	35
Sources bibliographiques par panneau	42
Les énergies dans les programmes collèges et lycées	43



Le mot de Madame la Rectrice

L'académie de Dijon est fière de présenter l'exposition « Sadi CARNOT, vers la maîtrise de l'énergie » dans le hall du rectorat. Cette exposition inaugure un cycle qui mêlera les arts, la science et les travaux pédagogiques de nos élèves. C'est ainsi que nous accueillerons prochainement une exposition de la photographe Paule Lanternier, puis les œuvres des lycées labellisés « Excellence des Métiers d'Art » de l'académie ou encore celles des lauréats de concours ou de projets comme Mix'Art.

L'exposition qui vous est proposée est consacrée à une grande figure de la thermodynamique : Sadi Carnot, dont le nom provient du poète persan Saadi de Shiraz, très admiré de son père. Sadi Carnot a été formé à l'école Polytechnique, avant de suivre des cours au Collège de France et à la Sorbonne. Il est le précurseur des travaux sur l'énergie. D'une curiosité insatiable, il s'est intéressé aux questions industrielles, a visité des ateliers et des usines, étudié la théorie des gaz ainsi que les dernières théories d'économie politique. Si son intelligence est fulgurante dans le domaine des mathématiques, les arts l'ont tout autant passionné. Ses travaux scientifiques demeurent d'une très grande actualité.

Pour toutes ces raisons, je suis très heureuse que les collégiens et lycéens de l'académie de Dijon aient l'occasion de voir, de comprendre et de découvrir peut-être, à l'aide de ce livret ainsi que des panneaux didactiques qui forment l'exposition elle-même, ce savant à la vie trop brève. Je souhaite à tous nos jeunes esprits une visite qui comblera leur soif de savoir et leur ouvrira, je l'espère, des perspectives de cursus scientifiques nouveaux et inédits.

Sylvie Fauchoux,
Rectrice de l'académie de Dijon,
Chancelière de l'université de Bourgogne

Le CCSTI de Bourgogne

Tête de réseau régional, le CCSTI de Bourgogne bénéficie du label « science culture, innovation » attribué après expertise par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

L'orientation et l'action du CCSTI sont construites dans le cadre d'un partenariat avec les grands établissements de recherche (Université, INRA, CEA, Agrosup...), les institutions et associations de culture scientifique, technique et industrielle, des collectivités territoriales. Ce travail est réalisé en concertation et en coordination avec le rectorat de l'académie de Dijon et en cohérence avec les priorités régionales de l'État et du Conseil régional de Bourgogne.

Avec une fonction de coordination et d'accompagnement des projets, parmi les 230 acteurs de culture scientifique, technique et industrielle, répartis sur tout le territoire, la gouvernance du CCSTI permet de valoriser les initiatives qui concourent à une meilleure connaissance des sciences et des technologies et de l'innovation dans l'ensemble des territoires de la région.

C'est dans cette dynamique que des initiatives comme la fête de la Science, l'édition d'ouvrages, de DVD, la diffusion de la lettre d'information, des circuits thématiques comme celui des énergies durables, ou encore la réalisation d'expositions et de document de présentation comme celui-ci peuvent se développer.

Dans une famille de Nolay, un grand physicien : Sadi Carnot

Un visage plein de douceur et de sérénité, un beau regard doux et franc, une attitude pleine de modestie, tel nous apparaît Sadi Carnot dans le seul portrait que nous ayons de lui à 17 ans, en uniforme de polytechnicien. Influencé par l'éducation scientifique reçue de son père Lazare, ce beau jeune homme préféra la recherche scientifique, menée dans la plus grande discrétion, à la carrière militaire.

À 28 ans il publia à compte d'auteur, son célèbre mémoire «**Réflexions sur la puissance motrice du feu**». Au début des années 1820, la chaleur ou calorique, était encore considérée comme un « agent impondérable » dont l'état est mesuré par la température et qui peut s'écouler d'un corps à un autre.

Bien que ces hypothèses courantes lui parussent insuffisantes, Carnot les adopta et en précurseur prodigieux, énonça ce qu'on appelle le **second principe de la thermodynamique**. Il comprit le premier, qu'une « machine à feu » comme on disait alors, n'a pas ses diverses parties à la même température. Il devina que cet écart des températures entre la source chaude et la source froide est essentiel et détermine le rendement maximum que l'on peut espérer.

Dans ses notes posthumes publiées en 1878, on peut lire que Sadi Carnot a repris et corrigé plusieurs points des «**Réflexions sur la puissance motrice du feu**». Le vocabulaire a changé avec les idées mais l'énoncé de 1824 garde toute sa puissance. Ces notes nous apportent également la preuve que Sadi Carnot eut le premier la notion de l'équivalence entre la chaleur et le travail, plus de 10 ans avant que James Prescott Joule ne trouve la vraie valeur et n'énonce le premier principe de la thermodynamique ! Depuis, son œuvre interrompue trop tôt par sa mort prématurée, a pris toute sa place, ce que Emile Picard a exprimé en ces termes le 8 juillet 1832, à l'occasion de l'inauguration de la plaque commémorative posée au Palais du Petit Luxembourg :

« Le fils aîné de Lazare Carnot fut un précurseur prodigieux dont les vues profondes devancèrent considérablement son temps, et ses «**Réflexions sur la puissance motrice du feu**», parues en 1824, ont ouvert à la science des voies entièrement nouvelles.»

Avec un retour en arrière de 200 ans, dans le paysage bourguignon du canton nolaytois, partons à la découverte du grand physicien Sadi Carnot et de ses travaux, dont l'importance est toujours d'actualité.

Établie en Bourgogne depuis le 15^{ème} siècle, la famille Carnot est connue à Nolay depuis Lazare Carnot (1631-1723) bailli qui joue un rôle dans la diplomatie de l'époque.

En 1719, naît Claude Carnot qui sera notaire, bailli, juge et père de la génération illustre. En 1745, il épouse sa voisine, Marguerite Potier qui lui donne 19 enfants dont 8 survivront (2 filles et 6 garçons) et illustreront la famille de façon éclatante.

Jeanne Pierrette est sœur hospitalière à l'Hospice de Nolay. Ses frères sont avocat au Parlement, notaire royal et maire de Nolay comme Jean François Reine ou juge et procureur ou receveur des domaines ou brillants militaires comme Claude Marie et Nicolas Marguerite Lazare, dit Le Grand Carnot.

Claude Marie Carnot dit Feulins fait une brillante carrière militaire dans le Génie puis dans l'artillerie. Il fait ses débuts dans le régiment de son aîné Lazare dont il est le fidèle et actif collaborateur jusqu'au Consulat. Son action énergique à la bataille de Wattignies fait de lui un Général de Brigade. En désaccord avec le Premier Consul, il démissionne mais revient à la vie politique pendant les cents jours avant de se retirer à Nolay.

Après une éducation familiale suivie d'études au collège d'Autun, Nicolas Marguerite Lazare est admis sur concours, à 17 ans, à l'École Militaire de Génie de Mézières. Ingénieur cultivé, bouillonnant d'idées philosophiques, il consacre ses loisirs aux recherches mathématiques et occupe des postes à Calais, Cherbourg et Béthune puis Arras où il rencontre Robespierre. Avec lui il fait partie de la société littéraire des « Rosati » où il cultive le culte du poète persan Sâadi de Shiraz du XII^{ème} siècle.

En 1792, nommé par l'Assemblée, « commissaire aux armées », il parcourt la France pour faire appliquer les réglementations. La victoire de Wattignies contribue à sa réputation de révolutionnaire engagé politiquement et militairement.

Nommé Chef d'État Major Général, la victoire de Fleurus (juin 1794) fait de lui l'organisateur de la victoire.

Alors qu'il faut réorganiser la France qui a fermé ses universités et perdu ses cadres, Lazare Carnot et d'autres savants dont Monge et Fourcroy créent en 1794 l'École Centrale des travaux publics, future École Polytechnique.

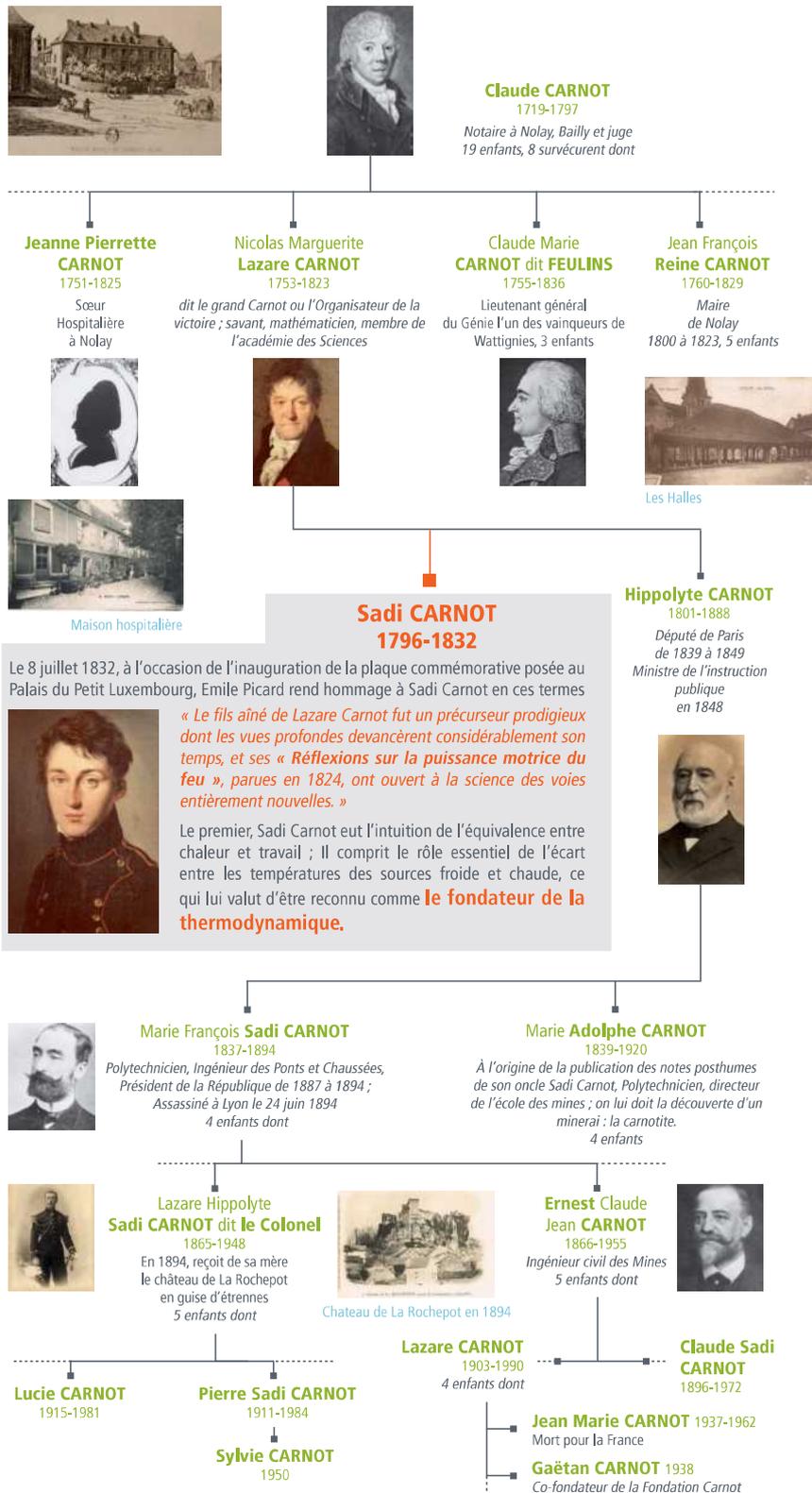
Retiré des affaires publiques, il veille à l'éducation de ses deux fils Sadi et Hippolyte tout en s'intéressant aux applications militaires des découvertes scientifiques et aux machines en général, dont le pyrèlophore des frères Niépce.

Son ralliement à l'empereur pendant les 100 jours où il fut ministre de l'intérieur et sa qualité de régicide, lui valent en 1816 le bannissement par Louis XVIII. Il s'exile à Magdebourg où il décède en 1823. Ses cendres sont ramenées au Panthéon en 1889 alors que son petit-fils est Président de la République.

Lazare a trois fils : le premier, prénommé Sadi, meurt prématurément ; le second est aussi appelé Sadi selon la tradition que Lazare a établie : chaque aîné de chaque génération s'appellera Sadi.

Hippolyte, le frère cadet de Sadi, fondateur de la thermodynamique, partage l'exil de son père à Magdebourg pendant 7 ans. Après avoir participé activement à la révolution de juillet 1830, élu député de Paris (1839-1849) il devient ministre de l'instruction Publique

Dans une famille de Nolay, un grand physicien : Sadi CARNOT



en 1848, année au cours de laquelle il fonde la première école d'administration. Bien qu'élu en 1850 et 1857 il ne siège pas car il refuse de prêter serment à Napoléon III. Membre du corps législatif en 1864, député républicain en 1871, il devient sénateur inamovible en 1875. Il a deux fils, Marie François Sadi et Adolphe qui le poussera à publier les notes inédites de Sadi en 1878.

Marie François Sadi entre à l'École Polytechnique et devient ingénieur des Ponts et Chaussées. On lui doit le système de régulation des eaux du lac d'Annecy et la conception d'un pont sur le Rhône. Il est élu député de la Côte-d'Or en 1871 et devient Ministre des Travaux Publics puis des finances. Il est élu 5^{ème} Président de la République en décembre 1887 et assassiné par un anarchiste en 1894. Seul président à y être inhumé, il repose au Panthéon avec son grand père Lazare.

Adolphe, polytechnicien comme son frère, il choisit l'École des Mines dont il deviendra directeur. Il est chimiste par vocation. Ses travaux de laboratoire sont orientés vers la chimie minérale en vue d'applications à la métallurgie. On lui doit la découverte de la Carnotite, minéral dans lequel on trouve du potassium, du vanadium, de l'uranium et des traces de radium.

Parmi les quatre enfants du Président, Lazare Hippolyte Sadi, dit le Colonel, reçoit de sa mère, en guise d'étrennes, les ruines du château de Larocheptot qui faisaient rêver le jeune homme de 28 ans. Il lui faudra près de 30 ans pour réaliser la restauration de ce qui est considéré aujourd'hui comme un fleuron de l'architecture néo-gothique bourguignonne.

Un autre fils de Lazare, Ernest est également ingénieur civil des Mines. L'un de ses fils, Lazare, rassemble une importante quantité de documents concernant sa famille. Cette collection constitue le Fonds Carnot déposé à l'Académie François Bourdon au Creusot par Gaétan, fils de Lazare et cofondateur de la Fondation Carnot.

Nolay, il y a 200 ans

Sadi et Hippolyte Carnot ont séjourné tous les deux à Nolay, bourgade où leur père Lazare est né et à laquelle il est resté très attaché. Sadi fit deux séjours chez son oncle Carnot Feulins : l'un à la fin de ses études en 1817, le deuxième en 1823 après la mort de son père en exil. Hippolyte vint à Nolay en 1820, envoyé par son père qui se languissait de Nolay dans son exil de Magdebourg. En 1863, il écrivait :

« La petite ville de Nolay, autrefois Duché de Bourgogne, aujourd'hui Côte d'Or, est nichée au creux d'un vallon agréable et pittoresque. Ses rochers, ses bois, ses bruyères, pouvaient présenter jadis un aspect sauvage et servir de retraite aux bêtes fauves ; mais ils alternent maintenant **avec de riches coteaux et de verts pâturages**, où l'œil aime à se reposer. Nolay est la première étape bourguignonne des Morvandeaux, lorsque l'automne ils descendent de leurs montagnes granitiques et neigeuses, cornemuses en tête, **pour venir vendanger la Côte d'Or**. (...). Nous ajouterons que **les vins de Chassagne et de Mont-Rachet** se récoltent dans son canton.

Saint-Martin le patron de son église, est celui des vigneron, et un peu celui des ivrognes, malgré sa dignité épiscopale ; ni les uns ni les autres ne manquent à sa fête. »

« Pour les hommes positifs, nous dirons que Nolay, située entre Beaune, Autun, Châlon, Armay et Montcenis, doit à cette position une petite activité commerciale ; que son cours d'eau, la Causanne, alimente **des tanneries**, que la pierre noire de ses carrières est susceptible d'un assez beau poli pour en faire des cheminées, et que le minerai de fer abonde dans ses environs.»

« J'ai dit que les environs de Nolay sont accidentés. Le lecteur me permettra de lui faire faire une promenade dans le vallon de la Causanne. Nous remontons sous de frais ombrages de noyers, entre des haies de buis et d'aubépine, cette petite rivière dont les eaux limpides font tourner **quelques roues de moulins**. »



Vendanges



Les tonneliers



Moulin



Les tanneries à Nolay



Les laboureurs

Hier à Nolay

En 1820, **52 vignerons, 14 marchands de vin, 9 tonneliers, des brandeviniers** : (celui qui va de maison en maison avec son alambic pour distiller le marc ou le vin),

17 propriétaires cultivateurs et/ou éleveurs, des laboureurs (louent leur force de travail, leur attelage et leur matériel pour travailler chez autrui),

13 voituriers (conducteurs de voiture à chevaux), **8 maréchaux ferrants, 9 charrons** (fabriquent ou réparent des chariots ou des charrettes à chevaux), **8 tanneurs et mégissiers** (accommodent les peaux de mouton, de veau), **des boursiers** (spécialisés dans les articles de cuir, notamment les harnais) ;

3 tailleurs de pierre, 3 couvreurs, 10 charpentiers, des plâtriers, des taillandiers (forgerons qui réalisent des outils tranchants pour l'agriculture tels que bêches, haches, faux...),

4 meuniers et des blatiers (vendent le blé sur les marchés), **7 boulangers, 3 bouchers et des huiliers** (huile de noix).

Quatre grandes foires annuelles, un marché chaque lundi,

Pour que la vie de cette population ou des voyageurs fût agréable, on trouvait aussi : **une dizaine d'aubergistes et cabaretiers, des marchands de cordes, d'étoffes, de draps, de fils, de dentelles, de linge ; des couturiers, des vanniers, des chapeliers, des tisserands, des perruquiers, des blanchisseuses** ainsi que **trois « officiers de santé », un notaire, un instituteur** (payé par les parents), **un armurier, des infirmières** à l'hospice des sœurs de la Charité, **des militaires** ainsi que **des gardiens à la prison**.



Vue de la place et de la grande rue de Nolay



Les Brandeviniers



Nolay - Place Carnot et rue de la République

En Europe dans les villes jumelées avec Nolay à la même époque

JALHAY Belgique



En 1794, la France se rend maître de la région. En 1796, la Convention proclame l'incorporation de la Principauté de Liège à la République française. En 1815, la défaite de Napoléon bouleverse les choses et voit la population passer sous l'autorité hollandaise suite au Congrès de Vienne.

En 1830, les Belges se révoltent devant les injustices dont ils sont les victimes et l'indépendance est proclamée.

En 1976, les communes de Sart-les-Spa et de Jalhay fusionnent.



Activités économiques et industrielles



L'eau publique et le barrage de Gileppe

Le barrage de la Gileppe (Jalhay) est inauguré le 28 juillet 1878 par le roi Léopold II. Sa capacité de 6 millions de m³ alimentait la ville de Verviers en eau potable ainsi que l'industrie lainière et drapière installée le long de la rivière « La Vesdre ». Cependant la commune de Sart-les-Spa était alimentée en eau par des puits publics (34 en 1899).



Energie hydraulique

Moulins à eau situés sur la Hoëgne et le ruisseau de Dison : moulins à farine et à ardoise

Energie tirée de la biomasse : Le bois.

La tourbe résulte de la décomposition des végétaux, notamment les sphaignes, en milieu très humide que sont les Hautes Fagnes. La tourbe était le combustible du pauvre.



L'électrification d'une partie de la commune de Sart-les-Spa commença en 1918 (Sart, Tiège et Solwaster). Les hameaux de Wayai et Cokaifagne devaient attendre 1922.



Le chemin de fer arrive le 20 février 1867 avec l'ouverture de la ligne Spa – Gouvy qui passe à 3 kilomètres du village de Sart (Jalhay). Il faut attendre 1898 pour voir la construction de la gare de Sart.

Dès 1880, un moulin à farine, un dépôt de bois, une coopérative agricole, une briqueterie, des hôtels et des maisons d'habitation s'installent progressivement aux alentours de la gare.



Filature de laine cardée Mullendorf et Cie à Polleur (Sart) (Lith. Edwin Tovey, - La Belgique industrielle - planche 179)

Productions industrielles au 19^{ème} siècle

À l'aube du 19^{ème} siècle, la région (Sart et Jalhay) se retrouvait dans un état déplorable : l'industrie métallurgique régionale avait vécu.

En 1841, sur le territoire de la commune de Sart-les-Spa, il y avait : 2 moulins à farine mus par eau, 1 fabrique de draps et 2 filatures de laine à la mécanique. De 1863 à 1894 exploitation d'une ardoisière (lieu-dit Roslin) entre Solwaster et Sart. En 1896, on comptait encore un moulin à farine à vapeur (20 CV) et un moulin à farine à eau.



Agriculture au 19^{ème} siècle

La production agricole était très insuffisante dans la région. Durant la première moitié du siècle, les familles élevaient peu de vaches car les terres défrichées étaient surtout réservées à la culture (seigle, avoine, pommes de terre).

Durant la seconde moitié du siècle, les familles abandonnèrent la fagne où ils avaient fauché les bruyères et l'herbe sauvage, récolté le foin aigre. Les terres cultivées furent pour la plupart transformées en bocage de prairies permanentes, clôturées. Les produits laitiers augmentèrent en rendement. Dans les villages, les fermiers fondèrent des laiteries : 1904 à Sart, 1912 à Tiège.

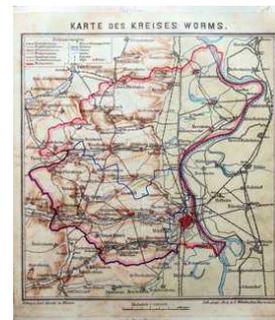
Pfeddersheim (Allemagne) de 1793 à 1816



Pendant la révolution française, Pfeddersheim fut occupé en 1793 par des troupes françaises. A partir de 1802, la ville devint chef-lieu de canton du département du Mont-Tonnerre (lignes bleues sur la carte).

Les lois et ordonnances françaises avaient cours à Pfeddersheim, notamment le code civil et le code impérial pendant le Premier Empire.

En 1795 Pfeddersheim comptait environ 2350 habitants dont les activités principales étaient l'agriculture (1250 ha) et la viticulture (61 ha).



On y trouvait de nombreux artisans : 2 meuniers, 2 serruriers, 2 charpentiers, 3 boulangers, 3 brasseurs, 3 commerçants, 3 maçons, 4 vitriers, 4 tailleurs, 4 menuisiers, 4 charrons, 5 bouchers, 6 taverniers, 9 toiliers et 10 cordonniers.

La voie ferrée Worms Pfeddersheim Alzey a été mise en service en 1867 ; la gare a été construite un an plus tard.



200 ans d'énergie à Nolay



le battage de Blé



Pressoir

Les énergies disponibles en 1820

Énergie musculaire : hommes, bœufs, vaches, ânes, chevaux pour les transports et l'agriculture mais aussi dans des «moulins» ou des «batteuses».

Énergie hydraulique : moulins sur la Cozanne et le ruisseau de Bruyère, moulins à grains, à tan, à foulon ou à huile.

Énergie tirée de la biomasse : bois et charbon de bois.

Énergie fossile : le charbon a été exploité à Epinac de 1774 à 1966 (à Veuvrotte) et jusqu'en 1953 à Aubigny-la -Ronce.

Les industries

L'activité de briqueterie remonte au 17^{ème} siècle. Dès le 18^{ème} une briqueterie fonctionne aux Louchardes (commune de La Rochepot) (bâtiments bas avec séchoirs). La production cesse en 1971, l'usine devient un dépôt vente qui ferme en 1989 et est rasé en 1990. À la fin du 17^{ème} siècle, début du 18^{ème}, **plusieurs tanneries** s'installent près de la Cozanne et de l'abattoir. La dernière tannerie a fonctionné jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. Les peaux servaient surtout à l'industrie de la chaussure (semelles).

Une brasserie commence à produire en 1848 et cesse son activité de maltage et brassage en 1939. Ses méthodes de fabrication lui valent une qualité reconnue qui justifie une médaille d'or à la foire de Lyon en 1894 et deux autres prix d'Honneur à Bruxelles et à Paris. En 1946-1947 le maltage est repris pour les brasseries de Chalon-sur-Saône.

M. Petit de l'Université de Nancy écrit dans son ouvrage « Analyse des bières » : « ...l'analyse établit que la bière de Nolay est absolument saine, garantie faite uniquement avec du houblon de 1^{er} choix. Elle est hygiénique car il faut ajouter que l'eau employée légèrement ferrugineuse contribue à rendre cette bière fortifiante et recommandable.».

Une scierie a fonctionné sous le viaduc de Rochabec.

Une usine électrique est mise en service le 28 août 1896, alimentée par une centrale thermique utilisant des résidus du charbon d'Epinac. On peut voir encore la base de sa cheminée en Maraine (à proximité de la route de Change). La centrale est fermée en 1912. Le courant électrique arrive alors par un câble d'une compagnie électrique d'Epinac.

L'entreprise CLEIA, spécialisée dans le matériel de travail de la terre cuite a pris, en 2010, la suite d'entreprises dont la première s'est implantée à Nolay en 1932.



La brasserie



Nolay, vue sur les usines

L'eau publique :

L'amenée d'eau depuis Cirey date des années 1775 : une fontaine unique à 4 robinets est installée sur l'actuelle place Monge. Un réseau de canalisation d'eau est mis en service en août 1886 avec dessertes de bornes fontaines et de quelques particuliers.



Place de la Fontaine

Le chemin de fer : ligne d'Etang sur Arroux à Chagny.

La ligne est entièrement ouverte à la circulation le 13 juin 1870 avec la mise en service du troisième tronçon : Epinac-Santenay alors que le premier tronçon Etang-Autun avait été ouvert le 16 septembre 1867 et le second Epinac-Autun le 26 octobre 1868. 165 000 hommes des armées de l'Est (Bourbaki) et des Vosges (Garibaldi) l'emprunteront en décembre 1870 - janvier 1871. Le service voyageur prend fin le 30 septembre 1979.



Viaduc de Cormot

Des communications à distance :

Le bureau de poste aux lettres est créé en avril 1774. Au début du 19^{ème} siècle, le faisceau de signaux optiques du télégraphe de Chappe (à usage militaire) passe au dessus du bourg de Nolay entre Mont Panterre et Rome Château. Le télégraphe électrique est installé à Nolay le 22 août 1884, avec usage public.

En 1908 le bureau de poste est déplacé à l'angle de la rue Saint Pierre et de l'avenue de la République ; il y reste jusqu'en 1982.

Le gaz naturel arrive à Nolay en 2002.

Dans les environs proches : Outre le charbon des houillères d'Épinac, on extrait du minerai de fer à Mazenay et à Change, de 1844 à 1914. Les concessions sont acquises par les établissements Schneider du Creusot à partir de 1852. En 1862, est mise en service une ligne de chemin de fer permettant d'acheminer le minerai au Creusot en passant par Saint Léger. Son utilisation cesse en 1914.



Nolay, vue générale

Sadi Carnot : l'homme de la Science



Sadi adolescent tableau de Félie Carnot, fille de Carnot Feulins.

Un élève brillant

Sadi Carnot naît le 1^{er} juin 1796 à Paris, au Palais du Petit Luxembourg, résidence des membres du Directoire dont fait partie son père Lazare Carnot, dit le Grand Carnot ou l'organisateur de la victoire. Son prénom Sadi évoque un poète persan du Moyen-Age, Sâadi de Shiraz.

De 1801 à 1811, Lazare redevenu simple citoyen, consacre son temps à l'éducation de ses fils Sadi et Hippolyte et à l'étude des machines.

Bon élève, Sadi confirme ses dispositions pour les sciences et rentre au lycée Charlemagne. En 1812, il a 16 ans et rentre à l'École Polytechnique où il est reçu 24^{ème} sur 179. Il y a comme professeurs Poisson, Hachette, Arago.

Les 29-30 mars 1814, Sadi participe avec le Bataillon des Polytechniciens à la défense de Paris et se distingue au cours d'un engagement à Vincennes.

En octobre de la même année, il sort 10^{ème} de sa promotion et est admis dans le Génie militaire comme élève sous-officier à l'école d'application de l'Artillerie et du Génie de Metz, héritière de l'École Royale du Génie de Mézières.

En 1815, son père Lazare, qui a été ministre de l'intérieur pendant la période des 100 jours, est banni par Louis XVIII et exilé à Magdebourg où son fils Hippolyte l'accompagne dans son exil jusqu'à son décès.

Une carrière militaire discrète :

En Avril 1817, Sadi sort de l'école de Metz comme sous Lieutenant et vient passer quelques mois à Nolay, chez son oncle le Lieutenant Général de Génie Carnot Feulins.

Ses affectations l'amènent dans différentes villes comme Besançon, Salins, Montpellier, Langres. Il se lasse très vite de la vie de garnison et du travail administratif qui lui incombe, aussi, en 1818 il se présente à un nouveau concours ouvert aux officiers pour constituer un Corps Royal d'État Major.

Reçu, il est nommé lieutenant d'État Major en 1819, mais demande rapidement sa mise en disponibilité pour se consacrer à ses activités scientifiques.

Il perçoit les 2/3 de sa solde sans exercer de fonctions et loue un modeste appartement dans la Marais, quartier de son enfance. Il fréquente les musées, les cours du Collège de France, de la Sorbonne, de l'École des Mines, du Conservatoire National des Arts et Métiers, visite des ateliers, des usines. Il joue du violon, pratique beaucoup de sports différents, s'intéresse à la littérature, aux arts, aux mathématiques, aux sciences et tout particulièrement aux machines thermiques et au flux de chaleur.

En Juin 1821, il est autorisé à rendre visite à son père exilé à Magdebourg depuis 1815. Il ne reverra pas son père qui meurt en exil deux ans après.

Un précurseur ignoré :

En Mai 1824, il fait imprimer à ses frais, 600 exemplaires de « **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance** » pour la somme de 459,55 francs soit 5000 F en 1970. Il a peu le sens de la publicité et néglige d'offrir son livre aux Arts et Métiers, à l'École des Mines ou des Ponts et Chaussées. Il présente lui-même son ouvrage à l'Académie des Sciences où sa présentation reçoit un accueil réservé.

En Mai 1828, il démissionne de son métier d'officier et vit, seul et dans l'ombre, grâce à un héritage de son grand père maternel. Il reprend ses travaux et en 1831, énonce la conservation de l'énergie mais ses feuillets ne sont pas publiés.

En août 1832, il meurt à la maison de santé du Docteur Esquirol à Ivry-sur-Seine, au moment de l'épidémie de choléra. Son frère Hippolyte détruit la majeure partie de ses documents et néglige de publier ses derniers travaux.

Ceux qui poursuivront son œuvre :

En 1834, **Emile Clapeyron**, polytechnicien, contribue à la compréhension mathématique du travail fondamental de Sadi Carnot et le traduit graphiquement.

En 1843, **James Prescott Joule** énonce l'équivalence mécanique de la chaleur, 1 calorie équivaut à 4,18 Joules, résultat pressenti par Sadi Carnot qui avait donné l'estimation de 3,7 Joules par calorie en 1832 (selon le système d'unités utilisé aujourd'hui).

Dix ans après sa publication, **William Thomson** qui deviendra Lord Kelvin, remarque le mémoire d'Émile Clapeyron et tente de retrouver l'ouvrage de Sadi Carnot. Il retrouve un exemplaire en 1848 et rend un vibrant hommage à son auteur ; il en déduira l'échelle absolue des températures.

En 1854, **Rudolf Clausius** comprend la portée de l'ouvrage de Sadi Carnot et introduit la notion fondamentale d'entropie qui domine toute la thermodynamique moderne.

Avec le principe de conservation de l'énergie, il met en accord Joule et Carnot !

Enfin en 1878, Sadi Carnot prend la place qui lui est due, lorsque, poussé par Adolphe, l'un de ses fils, son frère Hippolyte publie une partie de ses notes posthumes, dont l'intégralité sera publiée seulement en 1927.



Sadi Carnot en 1830,
portrait de Despoix.



Reproduction de la 1ère page du manuscrit
«Réflexions sur la puissance motrice du feu»

Sadi Carnot à l'École Polytechnique

Création de l'École Polytechnique :

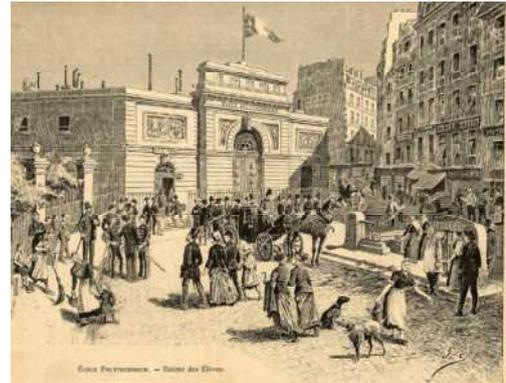
En 1793, le gouvernement fait appel à trois Bourguignons **Gaspard Monge** (Beaune 1746-Paris 1818), **Lazare Carnot** (Nolay 1753-Magdebourg 1823), **Prieur de la Côte d'Or** (Auxonne 1763-Dijon 1832) ainsi qu'à **Jacques Lamblardie** (Loches 1747-Paris 1797) pour réfléchir à un programme permettant de former un grand nombre de scientifiques et de techniciens. Dans ce but, l'Ecole Centrale des Travaux Publics est créée en mars 1794. Parmi les membres fondateurs, figurent aussi **Guyton-de-Morveau** (Dijon 1737-Paris 1816), professeur de chimie, **Pierre Nicolas Rolle** (Châtillon-sur-Seine 1770-Chaumes-les-Baigneux 1855) directeur-adjoint, **Pierre Jacotot** instituteur pour la chimie et bibliothécaire et son cousin Joseph Jacotot associé à la Police des élèves. Ces deux derniers quittent l'École en mai 1795. Le 1^{er} septembre de l'année suivante l'École devient « École Polytechnique » par la loi du 15 fructidor an III. D'autres Bourguignons apparaissent : **Joseph Fourier** (Auxerre 1768-Paris 1830) Instituteur d'Analyse, **François Chaussier** (Dijon 1746-Paris 1828) infirmier puis médecin de l'École et un peu plus tard, **Edmé-Marie Miel** (Châtillon-sur-Seine 1777-1830) dentiste de l'école.



Uniforme de Polytechnicien 1820



Shako



École Polytechnique - entrée des élèves

Le programme d'une semaine et les enseignants de la première année :

12h d'Analyse sont enseignées par **Jean Reynaud** qui avait été l'examineur de Carnot au concours d'entrée, est l'enseignant.

1h d'analyse infinitésimale (dérivation, intégration) est assurée par **François Arago**.

9h se rapportent à la Mécanique enseigné par **Denis Poisson** ; après des études de médecine il avait été reçu major à Polytechnique en 1798.

11h de géométrie descriptive sont traitées par **Hachette**.

6h de chimie générale et appliquée sont assurées par **Louis Jacques Thénard**. **Louis Joseph Gay-Lussac** enseignait la chimie à la 1^{ère} division .

4h de physique sont confiées à **Jean Henri Hassenfratz**.

6h sont consacrées au dessin topographique ou artistique avec **Pierre Antoine Clerc** et **François André Vincent** .

1h est consacrée à la grammaire et aux belles-lettres avec **François Andrieux**.

Sadi Carnot se soumet aux interrogations de professeurs et des répétiteurs. Ceux-ci avaient pour nom **Michel Pommiès** et **Louis Lefebure** pour l'analyse et la mécanique, **Jacques Binet** pour la géométrie descriptive et l'analyse appliquée à la géométrie, **Jean-Jacques Cluzel** pour la chimie, **Alexis Petit** pour la physique.

Sadi Carnot termine au rang 20 sur 179 cette première année. Ses notes sont bonnes notamment en analyse, physique et chimie et son application qualifiée de très soutenue, sa conduite de bonne.



Denis Poisson



Jean Henri Hassenfratz



Louis Jacques Thénard



François Arago



Jean Hachette

Sadi à l'École Polytechnique en 1812-1813

Sadi se présente en août 1812 au concours. Antoine-André-Louis Reynaud, répétiteur d'analyse à l'École l'interroge. Sadi est admis 24^{ème}, il a 16 ans. Le 12 octobre son père verse une somme de 1024,35 F dont 200 F pour le premier trimestre de pension, le reste pour l'habillement, le linge et les livres. Le 2 novembre, Sadi est incorporé dans la seconde division de l'École.

1813-1814

A la rentrée Sadi Carnot passe dans la première division et les cours d'analyse, de mécanique, d'analyse appliquée à la géométrie, de physique, de chimie, de dessin et de littérature se poursuivent avec les mêmes enseignants. Il faut ajouter des disciplines nouvelles comme :

4 heures pour l'art militaire avec Charles Duhays

2 heures avec la théorie des machines et la géodésie par Alexis Thérèse Petit.

4 heures avec Jean Nicolas Durand et l'architecture.

Les 29 et 30 mars les Polytechniciens participent à la défense de Paris. Louis XVIII arrive au pouvoir, l'enseignement de l'École est suspendu et ne reprend que le 18 avril. Sadi Carnot part à Anvers chercher son père, il rentre le 12 mai.

Le 12 octobre 1814, Sadi Carnot est déclaré admissible dans les services publics 10^{ème} de la liste de 65 élèves qui restaient de la promotion et il rejoint l'École d'application de Artillerie et du Génie de Metz où il apprendra en détail l'art militaire.

Sadi Carnot arrive en 1814 à l'École d'Artillerie et du Génie de Metz

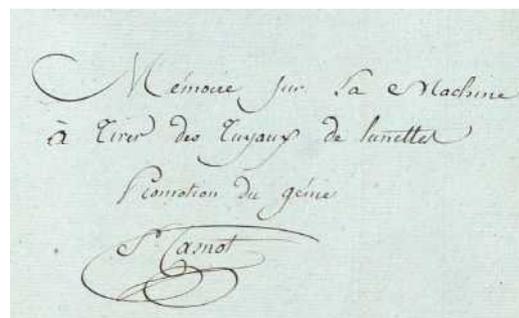
Sadi Carnot reçoit son brevet d'élève-officier du génie le 1^{er} octobre 1814 et entre à l'École de Metz dans les derniers jours de 1814 à l'issue d'une permission de détente. Il suit dans cette école d'application, héritière de l'école royale du génie de Mézières, les cours de mathématiques appliquées et de physique de Pierre Du Buat et de Jacques Frédéric Français, ceux de chimie appliquée aux arts militaires et de pyrotechnie de Chevreuse. Son brevet de lieutenant en second au 2^{ème} régiment de sapeur, marquant sa sortie de l'école et son entrée véritable dans la carrière militaire, est daté du 2 avril 1817.

Liste des travaux de Sadi Carnot lors de son séjour à Metz et conservés aux Archives de Polytechnique : Mémoire sur un problème de géométrie descriptive. Mémoire sur la machine à tirer des tuyaux de lunettes. Deux mémoires sur un projet de fortification passagère. Projet de fortification permanente. Plan d'usine : mémoire sur la sonnette à déclic. Projet de bâtiment militaire : École régimentaire de cavalerie. Lever trigonométrique (Ile Chambière). Projet de construction hydraulique : grand pont tournant. Lever d'usine : mémoire sur la buanderie militaire
Des feuillets se rattachent aussi à différents cours comme la chimie appliquée aux arts militaires, pyrotechnie militaire, attaque et défense des places, géodésie etc...

Emploi du temps d'un élève :

Lever à 5 heures, coucher à 21 h 15.

Les cours, travaux pratiques, interrogations ont lieu tous les jours sauf le dimanche, de 8 heures à 14 heures et de 17 heures à 20 heures ce qui correspond à 54 heures d'enseignement par semaine. Le temps libre est consacré à la toilette, aux repas, aux exercices militaires, au service de la chambrée, au travail en étude, à quelques sorties éventuelles en début d'après-midi.



Les professeurs de Sadi à l'École Polytechnique

En remplacement de Labey (La Chapelle –Infraise 1752-Paris 1825) professeur de mathématiques qui a des problèmes de santé, c'est Reynaud qui donne le cours d'analyse à Sadi Carnot après avoir été son examinateur au concours d'entrée.

Dominique François Jean Arago (Estagel 1786-Paris 1853) succède à Monge comme professeur de géométrie en 1810 ; professeur d'analyse appliquée à la géométrie, de géodésie et d'arithmétique sociale il participe à l'abolition de l'esclavage. Il travaille sur la réfraction de la lumière et la théorie ondulatoire de Fresnel. Il est le créateur des Comptes Rendus de l'Académie des Sciences en 1835.

Denis Poisson (Pithiviers 1781-Paris 1842), élève puis suppléant de Joseph Fourier, est professeur de mécanique à l'École Polytechnique, à la Faculté des Sciences de Paris et astronome. Ses centres d'intérêts multiples se rapportent à l'analyse mathématique, la mécanique céleste, les équations différentielles, la théorie de la chaleur, l'électricité, la lumière, le magnétisme, le calcul des probabilités.

Jean Nicolas Pierre Hachette (Mézières 1796-Paris 1834) popularise les méthodes nouvelles introduites par Gaspard Monge en géométrie et enseigne la géométrie descriptive.

Chimie

Louis-Jacques Thénard (La Louptière 1777- Paris 1857) est démonstrateur à l'École Polytechnique en 1798, puis professeur de chimie de 1810 à 1836 en remplacement de Guyton de Morveau. En 1818, il découvre l'eau oxygénée. Il devient fort riche avec notamment la fabrication du célèbre bleu de Thénard utilisé en émail pour la porcelaine et fonde la société des amis de la Science pour aider financièrement les scientifiques qui n'ont pas eu sa chance ; il meurt en 1857 à Paris.

Jean Henri Hassenfratz (Paris 1755-Paris 1827) est professeur de physique de la création de l'École Polytechnique jusqu'à la Restauration. Il travaille avec Monge et Lavoisier.

Topographie

François André Vincent (Paris 1747-Paris 1816), membre de l'Institut à sa création est professeur de dessin topographique ou artistique à l'École Polytechnique de 1808 à sa mort en 1816.

Clerc Pierre Antoine, (Nantua 1770- Metz 1843) Commandant de la brigade topographique en 1813.

Français

Le cours de français, grammaire et belles-lettres de **François Guillaume Jean Stanislas Andrieux** (Strasbourg 1759-Paris 1833) est très populaire à Polytechnique.

Les répétiteurs pour l'Analyse et la Mécanique :

Michel Pommiers et Louis Lefébure de Fourcy sont répétiteurs d'analyse, de mécanique et de géométrie descriptive.

Jacques Philippe Marie Binet (Rennes 1786-Paris 1856) est également répétiteur de géométrie descriptive, puis professeur de mécanique en remplacement de **Denis Poisson**. Dans le domaine de l'astronomie, ses formules de cinématique donnent l'expression en coordonnées polaires de la vitesse et de l'accélération des corps soumis à une accélération centrale, telles les planètes du système solaire (cf. formules de Binet).

Répétiteur pour la chimie

Jean-Jacques Cluzel (Riom ? -1813) est répétiteur de chimie de 1810 à 1813 date de sa mort provoquée par des gaz toxiques inhalés.

Répétiteur de Physique

Alexis Thérèse Petit (Vesoul 1791-Paris 1820), classé hors ligne par le jury de sortie de Polytechnique (promotion 1807) est nommé répétiteur d'analyse en 1809, puis répétiteur de physique en 1810. En 1811, il est un des tous premiers docteurs ès sciences pour la faculté des sciences de Paris. Il enseigne la géodésie en 1813 avant de succéder à **Hassenfratz** en Physique.

Pour les mathématiques il y a deux examinateurs,

Adrien-Marie Legendre (Paris 1752-Auteuil 1833) connu surtout pour les polynômes qui portent son nom et qui sont utilisés maintenant lors de la résolution de l'équation de Schrödinger et

Sylvestre-François Lacroix (Paris 1765-Paris 1843) qui est professeur d'analyse à Polytechnique de 1799 à 1808 et enseignant de calcul différentiel et intégral à la Faculté des Sciences de Paris. En 1821 il est le premier doyen de la Faculté des Sciences.

Examineur pour la Géométrie descriptive et la physique

Claude Joseph Ferry (Raon-l'Étape 1757-Liancourt 1845) est examinateur de géométrie descriptive à Polytechnique en 1798. Il s'exile volontairement en 1804, voyageant à travers l'Allemagne et la Russie. Il ne rentre en France qu'en 1809, occupant alors les fonctions de professeur à l'École d'artillerie de Metz, et à nouveau, d'examineur à l'École Polytechnique en 1812-1813.

Examineur pour la Chimie.

Pierre Louis Dulong (Rouen 1785-Paris 1838) découvre en 1812 le chlorure d'azote. En faisant des expériences sur ce composé très dangereux, il perd, à la suite d'une explosion, un œil et un doigt. Il devient examinateur à l'école Polytechnique de 1812 à 1819 puis professeur de chimie et de physique de 1820 à 1830 succédant à **Alexis Petit**.

En physique, **Dulong et Alexis Petit** reconnaissent que la chaleur spécifique des corps est en raison inverse du poids de leurs atomes et développent une théorie permettant d'expliquer **la valeur de la chaleur massique des métaux connue sous le nom de loi Dulong et Petit**. Sadi Carnot utilisera plus tard les résultats de Dulong et Petit.

1813-1814

Duhays Charles-Marie (Fay 1769-Sainte Périne 1845), instituteur temporaire de fortifications et de topographie à l'École en 1805, il est renouvelé l'année suivante et sa nomination alors est définitive.

Alexis Thérèse Petit, promotion 1807 dont les qualités avaient été très vite reconnues, enseigne la géodésie en 1813-14 avant de succéder à Hassenfratz dans son cours de Physique. Jean-Baptiste Biot écrit de lui, en 1821 : « Un projet qui l'avait spécialement occupé (...), c'était la théorie des machines. Chargé de professer cette théorie à l'École Polytechnique, il s'y était livré avec attrait ; et il avait entrepris d'y appliquer ces résultats généraux de la mécanique auxquels l'usage a fait donner le nom de principes, quoiqu'ils ne soient que des déductions des principes véritables, c'est-à-dire des conditions premières de l'équilibre et du mouvement ».

Jean-Nicolas Louis Durand (Paris 1760 - Thiais 1834) est nommé professeur d'architecture à l'École Polytechnique en 1796 où il enseigne jusqu'à sa retraite en 1834.

À l'École Polytechnique : quelques contemporains de Sadi Carnot

Promotion 1811

Alexandre Joseph Eugène **Guiraudet- Saint Amé** (Paris 1792- Neuilly 1860) démissionne en 1821 alors qu'il est lieutenant ; devenu libraire-imprimeur, il imprime les *Réflexions sur la puissance motrice du feu* en 1824.

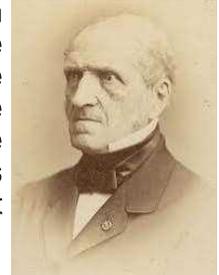
Olivier Théodore (Lyon 1793 - 1853) va créer l'École centrale des arts et manufactures à Paris.

Promotion 1812



Jacques Babinet (Lusignan Vienne 1794 - Paris 1872) ne reste qu'un an à Polytechnique et il part l'année suivante à Metz. Il invente plus tard le goniomètre à collimateur pour la mesure des indices de réfraction.

Michel Chasles (Epernon 1793 - Paris 1880) est classé dans le génie, il démissionne et se consacre à l'étude de la géométrie, son nom reste attaché à la relation de Chasles qui était d'ailleurs utilisée avant lui !



Promotion 1813



Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (Villiers en - Bière 1797 - Saint Ouen près Vendôme 1886) va faire les premières expériences précises sur l'écoulement des gaz à grande vitesse et étudier aussi les problèmes de flexion



Barthélémy-Prospér Enfantin (Paris 1796 - Paris 1864) devient l'un des principaux chefs du mouvement saint-simonien, il est ensuite à l'origine du canal de Suez et du développement du chemin de fer.

Pierre Achille-Marie Chaper (1795 -1874) sera 9 ans Préfet de la Côte d'Or.



Arthur Charles Morin (Paris 1795 - Paris 1880) est enseignant puis directeur du Conservatoire des Arts et métiers. La machine de Morin pour l'étude de la chute des corps était dans tous les Lycées.



Charles Gabriel Pravaz (Le Pont de Beauvoisin 1791 - Lyon 1853) quitte l'École Polytechnique en 1815 pour raisons familiales et se consacre à la médecine ; il invente la seringue à corps métallique et piston en pas de vis qui porte son nom.

Promotion 1814



Gabriel Lamé (Tours 1793 - Paris 1870) Ingénieur du corps des mines, il est envoyé en 1820 en Russie avec Clapeyron. A son retour en France en 1832 il est surtout connu pour ses travaux en élasticité.



Auguste Comte (Montpellier 1798 - Paris 1857), entre 1830 et 1842 publie son Cours de philosophie positive.

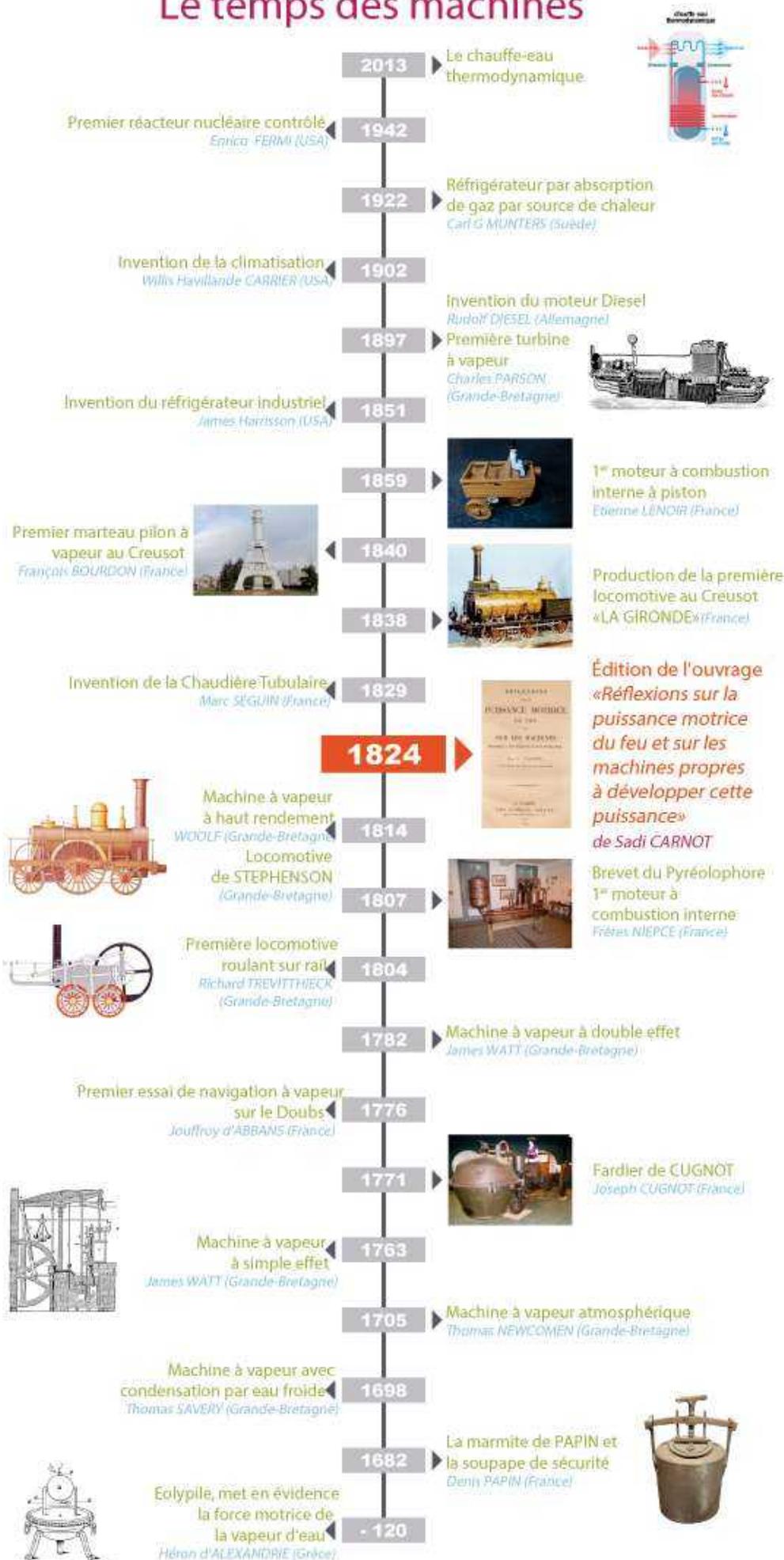
Promotion 1816



Emile Clapeyron (Paris 1799 - 1864) est envoyé en Russie en 1820 avec Lamé. Il rentre en France, en 1834, il publie dans le journal de l'École Polytechnique un Mémoire sur la puissance motrice du feu qui contribue à créer la Thermodynamique. Il sauve alors de l'oubli l'ouvrage de Sadi Carnot.

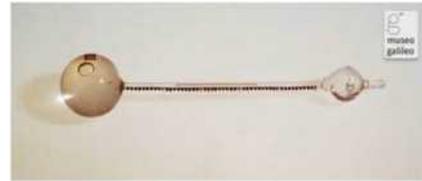
Le temps des machines

Le temps des machines



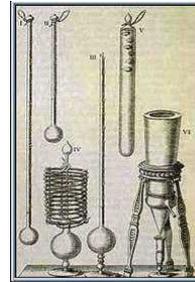
Température et chaleur

C'est à la fin du XVI^e siècle que **Galilée** comprend, au cours d'une expérience sur la chaleur, que l'air se dilate quand il s'échauffe et qu'il se contracte quand il se refroidit. Il conçoit les premiers thermoscopes : une sorte d'ancêtre du thermomètre, sans graduation. Comme le tube est ouvert à l'air, cet instrument est très sensible à toute variation de la pression atmosphérique.



Thermomètre florentin à alcool

Son utilisation est limitée aux applications médicales et météorologiques. Au milieu du siècle suivant (1754), les premiers thermomètres à tube scellé contenant du liquide voient le jour, sous l'impulsion du **duc de Toscane**. Les savants et constructeurs ne cessent par la suite de perfectionner le thermomètre à dilatation de liquide, avec notamment le choix du liquide thermométrique le plus adapté. Ainsi, le mercure remplace progressivement l'eau et l'alcool comme liquide thermométrique.



Thermomètres I - V et hygromètre VI



Thermomètres II

La nature de la chaleur

Robert Boyle, **Isaac Newton** et d'autres pensaient que la chaleur était associée à une vibration interne des corps. Cette explication se justifiait par le fait que la friction produit de la chaleur.

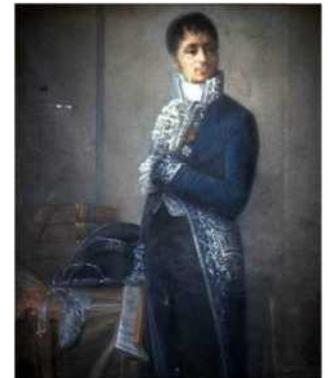
Mais un point de vue opposé prévalait au sein de l'école française. Il revenait à dire que la chaleur était une substance indestructible, semblable à un fluide, qui circulait entre les corps matériels. Cette substance était appelée le calorique. **Antoine Lavoisier** et **Pierre Simon Laplace** étaient de fervents partisans de cette théorie.

Cette controverse sur la nature de la chaleur anima les débats scientifiques jusqu'aux travaux de **James Prescott Joule** (1847) qui démontra que la chaleur n'est pas une substance indestructible et qu'elle peut être convertie en énergie mécanique. **La chaleur et l'énergie mécanique ne sont que des manifestations différentes d'une même grandeur physique : l'énergie. C'est l'objet du premier principe de la thermodynamique.**

Joseph Fourier (1768-1830) veut ignorer la controverse. Pour étudier la propagation de la chaleur, il adopte un point de vue différent : « La question de la propagation de la chaleur consiste à déterminer la température de chaque point d'un corps à un instant donné, en supposant que les conditions initiales sont données. »

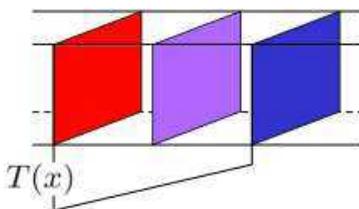
Le thermomètre et le chronomètre sont les instruments de mesure des expériences menées par Joseph Fourier.

Alors qu'il est préfet de l'Isère, Joseph Fourier entame ses travaux sur la propagation de la chaleur et réalise des expériences dans les locaux de la préfecture ! Dans la «Théorie analytique de la chaleur» qui est publiée en 1822, il introduit une nouvelle notion : le flux de chaleur qui est la «quantité de chaleur qui s'écoule, pendant un instant, à travers une section». Il montre que le flux de chaleur (dans une direction) est proportionnel à la différence de température imposée (dans cette direction). C'est une loi linéaire qui décrit le transport de chaleur de proche en proche, qu'on appelle la conductivité thermique. Cette loi est bien entendu en accord avec le second principe de la thermodynamique : la chaleur va du corps chaud au corps froid.

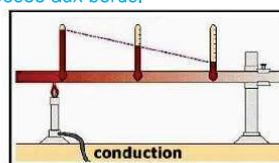


«Portrait du baron Fourier» habit de Préfet, pastel sur papier attribué (non certain) à Claude GAUTHEROT.

D'après la figure du manuscrit de 1807.

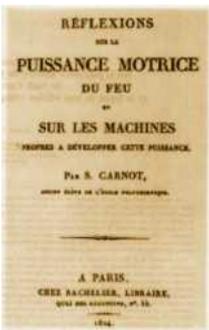


Observation du profil de température en fonction de la différence de température imposée aux bords.



Au départ, **Sadi Carnot** adopte la théorie du calorique. Pourtant, la force de son intuition l'a conduit à présenter le second principe de la thermodynamique. Finalement, il rejettera lui-même le concept de calorique en découvrant l'équivalence entre énergie mécanique et chaleur. (Notes manuscrites présentées par son frère Hyppolite à l'Académie en 1878).

«L'ouvrage fondateur»



Sadi Carnot analyse la défaite de Napoléon sur le plan économique. Si l'Angleterre a gagné l'ultime bataille contre l'empereur c'est grâce à sa puissance économique. Et cet essor est dû au développement de la machine à vapeur. Il énumère les ingénieurs qui ont contribué à son amélioration, uniquement des Anglais. Motivé par un devoir patriotique, Sadi Carnot étudie le fonctionnement de la machine de James Watt et veut en améliorer le rendement.

L'ouvrage de Sadi Carnot «**Réflexions sur la puissance motrice du feu**» ne ressemble pas à un livre scientifique ordinaire. Il ne trouve aucun écho dans la communauté scientifique du début du XIX^{ème} siècle. Il faudra attendre un quart de siècle pour que les travaux de Sadi Carnot soient lus et compris par Émile Clapeyron avant d'être universellement reconnus.

De la chaleur convertie en travail si il y a deux sources de chaleur (p12)*

“Partout où il existe une différence de température,(...) il peut y avoir production de force motrice.”

“Il est impossible d'extraire de l'énergie mécanique d'une seule source de chaleur.”

“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.”

Sadi Carnot énonce la condition de travail maximum (p23)*

“La condition nécessaire du travail maximum est donc qu'il ne se fasse dans les corps employés à réaliser la puissance motrice de la chaleur aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume. Réciproquement, toutes les fois que cette condition sera remplie, le maximum sera atteint. Ce principe ne doit jamais être perdu de vue dans la construction des machines à feu ; il en est sa base fondamentale. Si l'on ne peut pas l'observer rigoureusement il faut du moins s'en écarter le moins possible.”

Ceci n'est réalisable que pour des processus qui se font infiniment lentement.

Adopter un point de vue assez général (p.7)*

“Le phénomène de la production du mouvement par la chaleur n'a pas été considéré sous un point de vue assez général.”

Les processus sont réversibles : l'idée du cycle

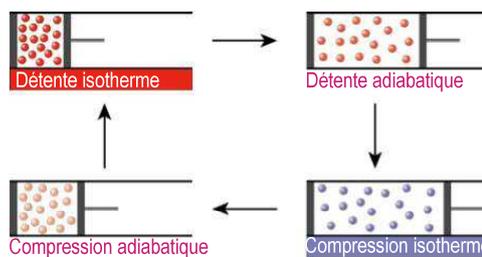
Pour comprendre comment la chaleur produit du travail mécanique avec le meilleur rendement possible, Sadi Carnot imagine une machine idéale, cyclique et réversible manipulée par un opérateur virtuel.



Les quatre étapes de la machine idéale :

1. On chauffe le système en le mettant en contact avec une source chaude. Le système se met à se détendre lentement en évitant toute variation de température. **C'est l'étape de détente isotherme** pendant laquelle le système reçoit une quantité de chaleur.

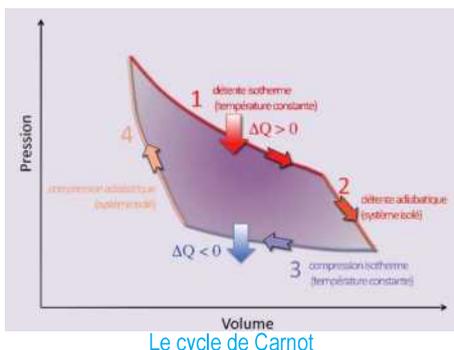
2. L'opérateur virtuel isole le cylindre de la source de chaleur, le système continue à se détendre et sa température baisse. **C'est la détente adiabatique.**



4. Finalement, l'opérateur retire la source froide et le système continue à se comprimer. **C'est la compression adiabatique.**

3. Dès qu'il a atteint la température de **la source froide**, l'opérateur le met en contact avec cette source. La machine restitue un quantité de chaleur et le piston repart dans l'autre sens. **C'est la compression isotherme.**

En 1833, Émile Clapeyron illustra les quatre étapes de la machine idéale en dessinant un graphique dans le plan pression – volume. Ce graphique est très célèbre et représente ce qu'on a coutume d'appeler le cycle de Carnot.



Le cycle de Carnot

L'impossibilité du mouvement perpétuel (p. 21-22)*

“Or s'il était possible ... de faire produire ... une quantité de puissance motrice plus grande ... il suffirait de distraire une portion de cette puissance ... pour rétablir les choses dans leur état primitif ... et se mettre en mesure de recommencer ... ce serait là ... un mouvement perpétuel. Une semblable création est tout à fait contraire aux lois de la saine physique.”

La thèse la plus importante de l'ouvrage qui a conduit Kelvin à introduire la notion de température absolue (p38)*

“La puissance motrice est indépendante des agents ... fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait la chute du calorique.”

En créant une machine idéale qui ne fait intervenir que des processus réversibles, sans frottement, sans perte de chaleur, Sadi Carnot fonde la «science des processus thermiques» et énonce le second principe de la thermodynamique.

*Extrait de l'ouvrage «Réflexions sur la puissance motrice du feu»

L'énergie... c'est quoi ?



Le mot énergie vient du grec ancien
ἐνέργεια = force en action

Beaucoup de manifestations dans tous les domaines de la Science...
 Est-ce la même chose ?



Conversion des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs.

Énergie potentielle

Exemple de gravité :

$$E_g = mgh$$

Énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Énergies non renouvelables

Énergie nucléaire



Énergie fossile



Énergies renouvelables

Énergie solaire



Énergie éolienne



Énergie hydraulique



Énergie géothermique



Travail et Chaleur sont aussi des formes "palpables" d'énergie

L'Énergie est un concept... ce n'est pas matériel

Elle donne la "mesure" d'une opération d'échange

C'est un peu une "monnaie d'échange" entre les phénomènes physiques

L'Unité de cette monnaie est le Joule

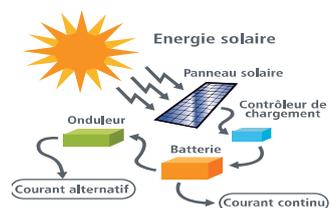
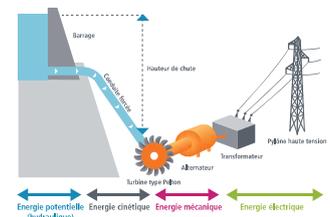
James Prescott Joule (1818-1889)

1Watt = 1 Joule/s : unité de puissance

1Kilowattheure = 3600 Kilojoules : unité d'énergie

Quelles lois ou règles régissent ces échanges ?

C'est l'objet de la THERMODYNAMIQUE



1^{ère} loi -> La conservation de l'énergie

(principe : pas démontré mais jamais démenti)
Loi de quantité

Dans un procédé, à toute échelle,
l'énergie ne peut que s'échanger

On ne peut ni en produire ni en faire disparaître

Bilan de l'énergie
d'un système

Si entrée > sortie $\Delta E > 0$

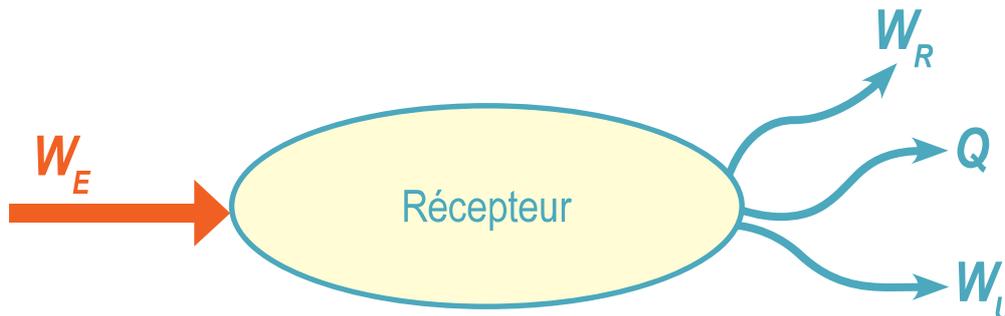
Si entrée < sortie $\Delta E < 0$

L'énergie d'un système isolé est constante $\Delta E = 0$



Mise en évidence des pertes de chaleur
d'une habitation par caméra infrarouge.

Échelle de couleur = Échelle de température



$$W_E = W_R + Q + W_U$$

Travail électrique Transfert environnemental Travail utile

Ce que l'on nomme, **perte d'énergie**
ou déperdition d'énergie, est un
échange défavorable au confort
ou à une production optimale. Elle
se manifeste le plus souvent par
la chaleur Q ou par de l'énergie
rayonnante W_R .

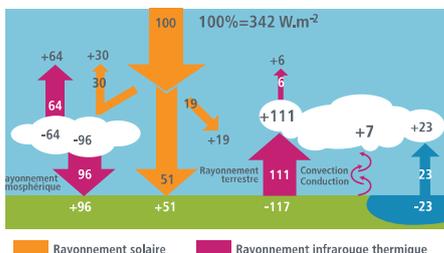
Pertes thermiques,...

Ce que l'on nomme, **production d'énergie**, est une transformation favorable aux
besoins de l'homme mais qui constitue un prélèvement sur un stock. Cela se
manifeste le plus souvent par un travail W .

Énergie fossile, énergie nucléaire, moteurs,...
énergie solaire

En considérant l'univers comme un système isolé,
Rudolf Clausius (1822-1888), a pu écrire
"l'énergie de l'Univers est Constante"

(1^{er} principe)

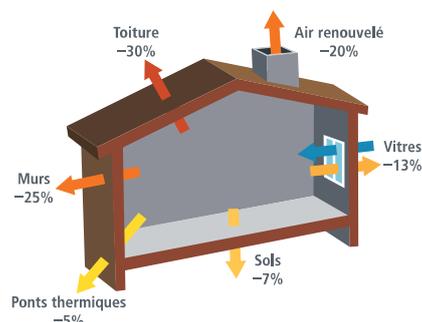


Conséquences ?

- La question des économies d'énergie en est la conséquence...
- La terre peut en première approximation être considérée comme un "petit univers"

Contenu énergétique constant...

Dans toutes les applications, il faudra vérifier
cette conservation de l'énergie.
Ex. : exploitation agricole, bâtiment, moteur,
alimentation.



2^{ème} loi -> Dissipation de l'énergie

Loi de qualité Production d'entropie

Toute transformation a un coût. Elle ne restitue pas la totalité de l'énergie qu'elle consomme.

Le rendement R est inférieur à 1

L'énergie cinétique recueillie dans le déplacement d'une voiture est inférieure à l'énergie amenée par le carburant consommé.

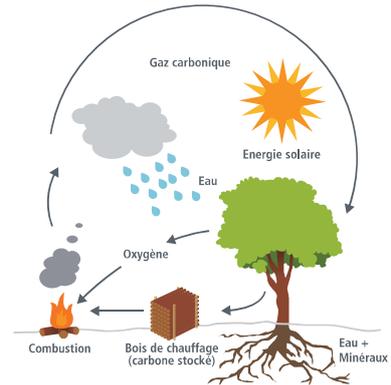
Frottements, aérodynamique, gaz d'échappement...

Rendement maximal R d'un moteur Diesel : 45%, à essence : 35%

Cas du conducteur électrique, pertes par effet Joule
Lampes incandescentes R < 2%
Tubes fluo R < 15%



Cas de l'énergie solaire utile pour la photosynthèse
0,023% du rayonnement reçu par la terre est utilisé pour la photosynthèse (le rendement énergétique de la photosynthèse est en moyenne de 4 à 8%).



La chaleur est la forme la plus répandue de la dissipation de l'énergie : E

E utile < E consommée -> Δ(E utile - E consommée) = E dissipée souvent notée Q

Q/T matérialise la grandeur thermodynamique appelée Entropie (S), définie par Clausius en 1865



L'entropie caractérise la qualité de l'énergie par un critère d'ordre.
Moins d'entropie = plus d'ordre

Suite aux travaux de Sadi Carnot, le rendement du cycle idéal de Carnot peut s'exprimer comme

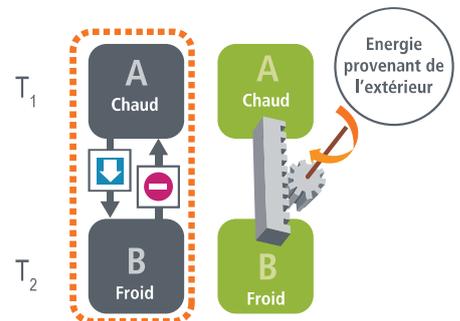
$$R_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

source froide
source chaude

nécessairement R < 1

T₂ température absolue de la source froide.
T₁ température absolue de la source chaude.

$$T_{\text{Kelvin}} = t_{\text{c}} + 273,15$$



Il existe des transformations spontanées impossibles, par exemple le transfert de chaleur direct d'un corps froid vers un corps chaud.
(il faut un auxiliaire... par exemple le moteur du réfrigérateur)

Dans les faits R_(réel) < R_(max)

Un seul sens possible
celui qui crée de l'Entropie. Elle oriente la flèche du temps vers le futur.

Niépce invente le Pyrèolophore

À propos d'énergie... et si les frères Niépce étaient concernés ?

Le nom de Niépce et son énigmatique prénom de Nicéphore est associé à l'invention de la photographie. Mais quelques passionnés d'histoire des sciences ont exhumé, le mot n'est pas trop fort, un curieux brevet signé de Napoléon à Dresde en 1807. Ce brevet accordé aux deux frères Niépce (Claude, l'aîné, indissociable de Joseph "Nicéphore") décrit minutieusement une invention extraordinaire pour cette époque : **le premier moteur à combustion interne.**

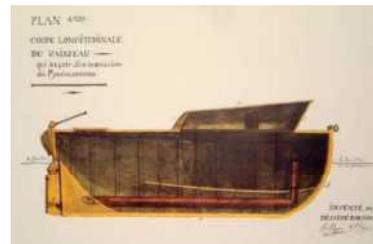
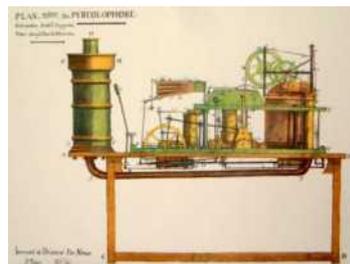
Ce moteur, révolutionnaire dans sa conception fut baptisé "PYREOLOPHORE" :

Pyr : le feu, éole : l'air et phore : qui porte, l'interprétation de ce terme donne donc : "qui est mu par l'air dilaté par le feu" ou moteur à combustion interne. On dit couramment moteur à explosion mais le terme est impropre scientifiquement.

Ce moteur était essentiellement destiné à propulser des bateaux car, il était associé à une autre invention inattendue : le réacteur à eau !

Le bateau des frères Niépce fut mis à l'eau au port Villiers à Chalon-sur-Saône et l'on sait qu'il remontait la Saône à deux fois la vitesse du courant.

Malgré la reconnaissance scientifique de l'Académie et l'énorme progrès au regard de la machine à vapeur existante, appelée alors pompe à feu, ce fut un échec commercial total. Les deux frères ont été victimes du lobby des magnats des machines à vapeur qui avaient investi les lieux de décision : finances, politique, sciences.



La machine à vapeur est une machine à combustion externe et la formidable intuition des deux frères est de penser que la combustion interne offre un rendement très supérieur à sa concurrente. Cette intuition sera démontrée par les travaux de Sadi Carnot un peu plus tard.

Dans le cadre de la maison de la première photographie, à Saint Loup de Varennes, des passionnés ont reconstitué, à l'échelle 1, le moteur des frères Niépce.



Quels sont les liens entre Nicéphore Niépce et Sadi Carnot ?

À l'Académie des Sciences Lazare Carnot et Claude Louis Berthollet publient le 15 décembre 1806 un rapport affirmant que : *"les commissaires pensent que la machine présentée sous le nom de pyrèolophore par Messieurs Niépce est ingénieuse, qu'elle peut devenir intéressante par ses résultats physiques et économiques, et qu'elle mérite l'approbation de la classe"*.

Par ailleurs Nicéphore Niépce et Lazare Carnot ont entretenu une correspondance nourrie à propos d'autres inventions. Elle est répertoriée et accessible sur le site de "La Maison Niépce" où l'on peut accéder au remarquable ouvrage de Manuel Bonnet et Jean Louis Marignier : *"Niépce correspondance et papiers"*.

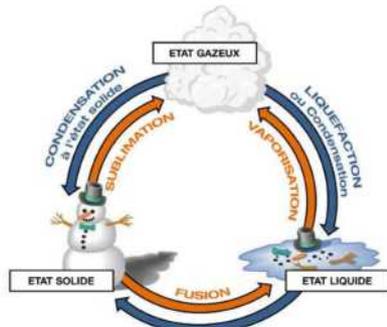
Sadi Carnot fait aussi référence au Pyrèolophore dans son ouvrage : *«Parmi les tentatives faites pour développer la puissance motrice du feu par l'intermédiaire de l'air atmosphérique, on doit distinguer celles de MM. Niépce, qui ont eu lieu en France il y a plusieurs années, au moyen d'un appareil nommé par les inventeurs pyrèolophore»*.

Comment une invention peut elle en cacher une autre ?

En 1816, Nicéphore Niépce était dans une impasse dans ses travaux photographiques. Il obtenait des négatifs qu'il appelait alors «rélines», avec du chlorure d'argent mais l'image obtenue continuait de noircir à la lumière ; elle n'était pas fixée.

C'est en travaillant sur un nouveau carburant pour son moteur, le bitume de Judée, qu'il en découvre les propriétés photosensibles définitives. Après huit années de recherche, en 1824, il peut fixer une image après l'avoir inversée en positif avec de l'iode.

La machine à vapeur



Changements d'état



train en gare de Nolay

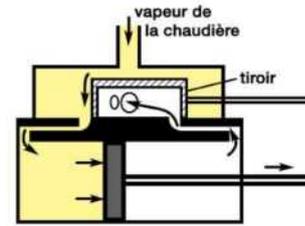
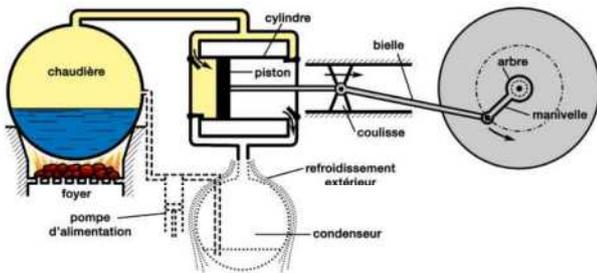
La matière existe sous trois états : solide, liquide et gazeux.

Le passage d'un état à un autre se fait avec consommation d'énergie ou dégagement d'énergie →
←

2 états différents peuvent coexister ; on parle alors d'équilibre.

A l'équilibre pour la vapeur d'eau et l'eau liquide, on parle de vapeur saturante.

Principe d'une machine à double effet



Tiroir à coulisse

Dans une chaudière, de l'eau est vaporisée sous pression. La vapeur produite est admise dans un cylindre successivement de part et d'autre d'un piston dont elle provoque le déplacement alternatif. A chaque fin de course, la vapeur qui vient de repousser le piston est refoulée dans l'atmosphère ou dans un condenseur.

Un système de distribution à tiroir assure le contrôle des orifices d'admission et d'échappement de la vapeur du cylindre.

Un système bielle manivelle transforme le mouvement de va et vient du piston en mouvement de rotation continu de l'arbre.

Le condenseur

La vapeur qui a poussé le piston pendant une course est refoulée dans le condenseur, enceinte où règne un vide partiel. La condensation de la vapeur s'accompagne d'un dégagement de chaleur important. Un refroidissement efficace permet de maintenir la température aux environs de 50 °C à une pression de 0,1 bar et d'améliorer le rendement. Les locomotives n'ont pas de condenseur. Elles rejettent donc la vapeur à la pression atmosphérique de 1 bar et donc 100 °C.

La chaudière

Dans une chaudière, l'eau que l'on vaporise est en équilibre avec la vapeur produite qui est saturante.

La pression de la vapeur saturante n'est fonction que de la température et croît rapidement avec cette température suivant la formule de Duperray $P \text{ (bar)} = (t/100)^4$ (t en °C).

Dans une locomotive moderne, par exemple, la chaudière portée à une température de 210 °C fournit de la vapeur saturante de l'ordre de 20 bars.

Le deuxième principe montre qu'il y a intérêt à avoir un écart de température maximum entre la source chaude et la source froide pour obtenir un bon rendement. Cependant, l'augmentation de pression correspondante peut générer des risques d'explosion de la chaudière.

Lorsque la vapeur est prélevée dans la chaudière, de l'eau se vaporise immédiatement pour la remplacer et maintenir la saturation. Il faut donc réalimenter en eau et la chauffer pour la vaporiser.



Exemple de la 241 P 17 : la consommation 150 L d'eau et 50 kg de charbon au Km parcouru.

Que se passe-t-il dans le piston ? : diagramme pression volume en Fig 2

Les figures représentent les variations de volume et de pression au cours d'un cycle dans l'un des compartiments du cylindre.

2a : cas théorique .

AB : la vapeur remplit le cylindre à pression constante P_1 lors du déplacement du piston.

BC : La soupape d'échappement s'ouvre et la pression baisse à la pression du condenseur P_2 .

CD : Le piston revient à sa position de départ échappant la vapeur vers le condenseur à la pression P_2 .

DA : le cylindre est mis en communication avec la chaudière : la pression passe de P_2 à P_1 .

La figure 2b représente le diagramme réel : Il prend en compte la durée d'établissement des pressions et le fait que le piston ne touche jamais le fond du cylindre.

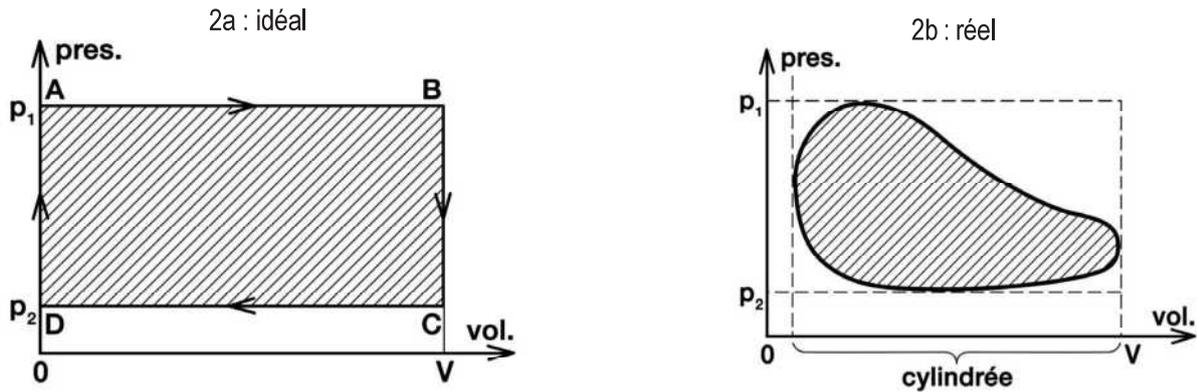
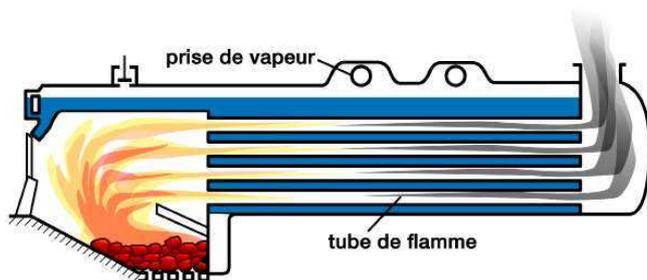


Fig 2 : Diagrammes pression volume

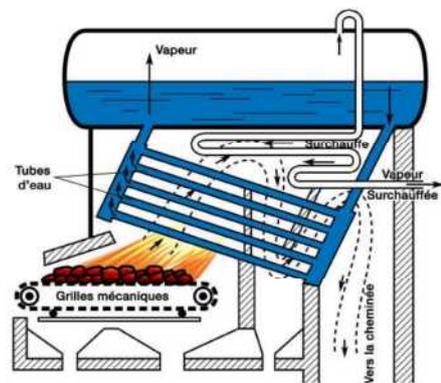
La chaudière tubulaire

Pour favoriser l'échange thermique entre le foyer et l'eau, on utilise des chaudières tubulaires invention de Marc Seguin. L'eau (chaudière standard) ou les gaz de combustion (locomotive) circulent dans les tubes.

Par ailleurs, on peut aussi utiliser l'énergie thermique résiduelle des gaz de combustion pour surchauffer la vapeur et améliorer le rendement de quelques pour cent.



Chaudière tubulaire à gaz de combustion



Chaudière tubulaire à eau

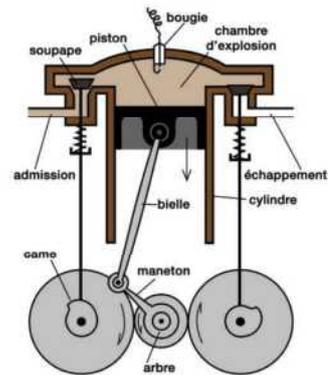
Le moteur à explosion

Principe :

Dans un moteur traditionnel, le cylindre reçoit du carburateur un mélange d'air et de combustible qui est comprimé puis enflammé par la bougie. Dans les moteurs à injection, le combustible est directement injecté dans le cylindre.

Les gaz de combustion sont à haute température ce qui accroît la pression, induisant une forte poussée sur le piston.

Le mouvement qui en résulte est transmis à l'arbre du moteur par le système bielle manivelle.



Les 4 temps du moteur à explosion à allumage commandé :

1^{er} temps ; (a) Admission : Le premier temps démarre piston haut ; Le piston descend entraîné par l'inertie. Seule la soupape d'admission est ouverte et le cylindre s'emplit du mélange explosif air- carburant dosé par le carburateur. (Dans un moteur à injection (diesel ou essence injection), seul l'air éventuellement turbocompressé est admis.)

2^{ème} temps ; (b) Compression : Le piston remonte toujours entraîné par l'inertie. Les deux soupapes étant fermées, le mélange air carburant est comprimé (air seul pour le moteur à injection)

3^{ème} temps ; (c) Explosion et détente : A la fin de la compression, se produit l'allumage grâce à une étincelle électrique entre les électrodes d'une bougie. (Dans les moteurs à injection, le carburant est introduit dans le cylindre à haute pression par un injecteur. Il s'enflamme spontanément.)

Dans le mélange haute pression et chaud, la combustion est extrêmement rapide, la température et la pression s'élèvent. Le piston est fortement repoussé vers le bas.

4^{ème} temps ; (d) Échappement : Lorsque le piston arrive en position basse, la soupape d'échappement s'ouvre et le piston qui remonte par inertie chasse les gaz brûlés dont la température a fortement diminué. Quand le piston arrive en position haute, la soupape d'échappement se ferme et celle d'admission s'ouvre. Un nouveau cycle commence.

Nota : Sur les 4 temps du moteur, seul le 3^{ème} temps est moteur. Les 3 autres temps consomment de l'énergie.

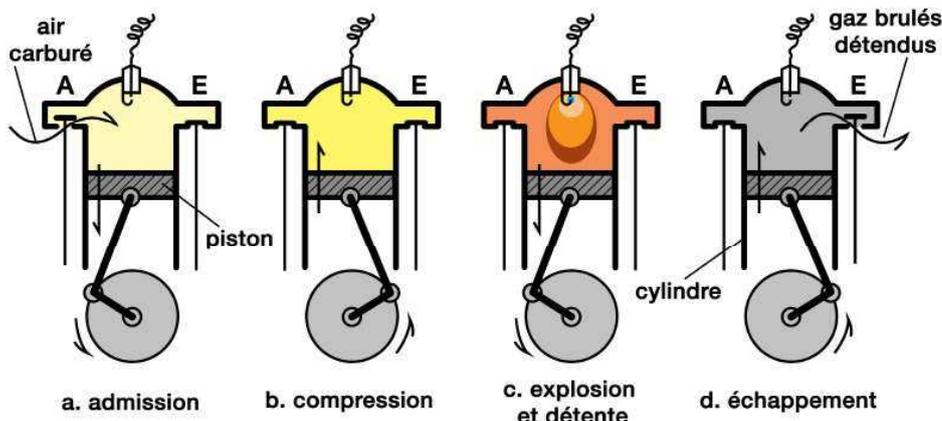
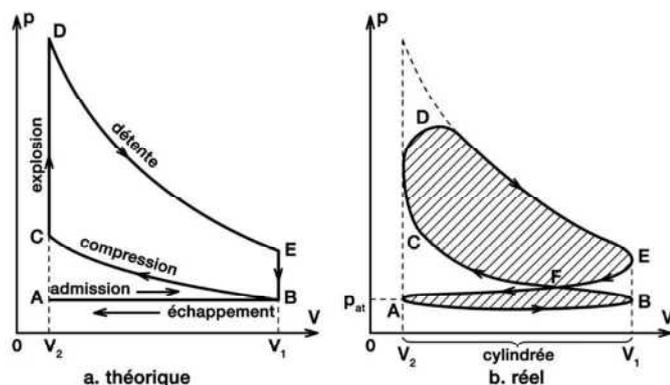


Fig 2 : Les diagrammes Pression Volume du moteur à explosion 4 temps

Rendement de Carnot :

$$t_1 = 2000^\circ\text{C} ; t_2 = 800^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 2273\text{ K} ; T_2 = 1073\text{ K}$$



$$\text{Rendement théorique maximum} = 1 - (1073 / 2273) = 0,53$$

Rendement réel : Diesel : 0,45 , Essence : 0,35

Moteur à autoallumage (Diesel)

Comme le moteur thermique à essence, le moteur diesel est constitué de pistons couissant dans des cylindres. Son fonctionnement repose sur l'autoinflammation du gazoil injecté dans le cylindre où l'air comprimé.



Les moteurs modernes

Objectifs : Améliorer le rendement (env 0,4) et réduire la consommation.

Nota ; Vers 1970, le moteur de la « SIMCA 1000 », 1 litre de cylindrée*, développait 35 CV**.

Les moteurs modernes avoisinent les 100 CV par litre de cylindrée.

*cylindrée : Surface du piston × course × nombre de pistons.

**1 CV = 736 watts,

Moteur 2 temps à allumage commandé

Le moteur à combustion interne à deux temps :

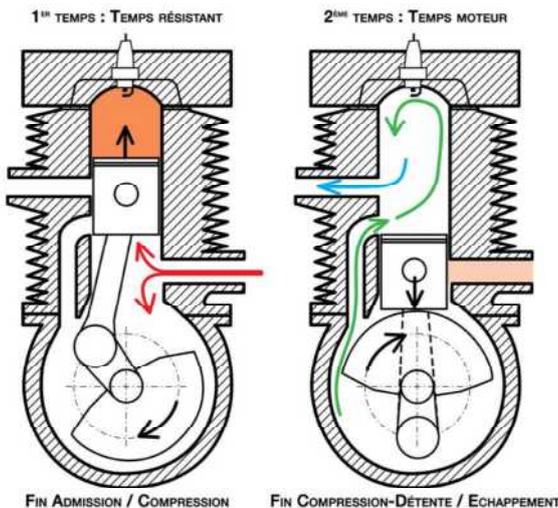
Le moteur 2 temps concentre sur un tour d'axe les 2 tours du moteur à explosion à 4 temps.

Sa conception est simplifiée ; Il n'y a ni soupape, ni distribution. Ces fonctions sont réalisées par des lumières ouvertes ou fermées par la jupe du piston. Une liaison appelée canal de transfert relie le haut et le bas du moteur

1. Principe de fonctionnement

Premier temps résistant : L'admission d'un mélange air-essence-huile s'effectue dans la partie basse du moteur et la compression en haut du piston.

Deuxième temps moteur : Suite à allumage de la bougie, les gaz sous pression issus de la combustion repoussent le piston, puis s'échappent par la lumière dégagée ; Enfin, le mélange gazeux admis est transféré du bas en haut par le canal de transfert.



2. Principales caractéristiques

- La conception est simple, le moteur est léger et compact.
- A cylindrée égale, la puissance de ce moteur est voisine de 1,7 fois celle du moteur à 4 temps.
- Le moteur 2 temps a un faible couple à bas régime
- Ce type de moteur utilise un carburant « mélange essence & huile » qui lubrifie l'ensemble mécanique mais rejette des fumées d'huile dans l'atmosphère. Ce moteur est donc polluant.

Applications

Le moteur 2 temps a aussi été utilisé dans l'industrie automobile : Vespa 400 fabriqué à Fourchambault (58)



Le moteur 2 temps a été utilisé dans l'industrie automobile : Trois millions de Trabants ont été produites dans l'ex RDA jusqu'en 1990. La technologie a aussi été utilisée en Pologne (Syrena), en Suède (Saab) et en Italie (Isetta) puis abandonnée.

Jusque dans les années 1970, les moteurs 2 temps sont utilisés sur des motocyclettes.



Ces applications ont été abandonnées pour cause de pollution. La technologie est utilisée aujourd'hui sur des équipements légers ou portables (tronçonneuse, débroussailleuse, karting, ...).

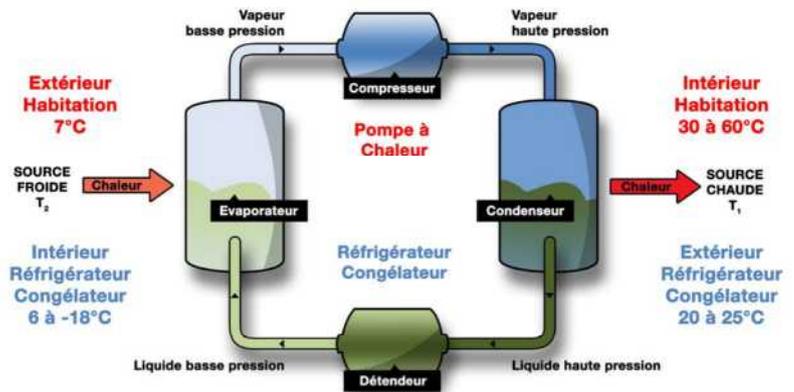
Chauffer et refroidir

Machine à compression détente

Principe des machines à compression détente

Elles se composent de 4 éléments principaux :

- un échangeur
- un compresseur
- un autre échangeur pour restituer
- un détendeur



Pompe à chaleur, réfrigérateur, congélateur, climatiseur, chauffe-eau thermodynamique

Les quatre phases du cycle

1 : La compression :

Le compresseur aspire le fluide frigorigène qui se trouve dans l'évaporateur sous forme de gaz à basse température. Durant la compression, la température du gaz s'élève en même temps que sa pression. A la sortie du compresseur, le gaz est chaud et à pression élevée.

2 : Diffusion de la chaleur au condenseur

Le gaz chaud est dirigé vers un échangeur appelé condenseur dans lequel circule un fluide à réchauffer (eau du réseau de chauffage ou air intérieur pour la PAC et air extérieur pour réfrigérateur). Le gaz chaud transmet une partie de son énergie au fluide à chauffer. Ce faisant, le gaz frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide (d'où le nom de condenseur).

3 : La détente

Le frigorigène à l'état liquide et à pression élevée est détendu au travers du détendeur. La pression diminue, abaissant ainsi la température du frigorigène qui reste à l'état liquide. A la sortie du détendeur, la température du frigorigène est inférieure à la température de la source de captage (PAC) ou des aliments (réfrigérateur) : Source froide.

4 : La récupération de la chaleur de l'environnement par l'évaporateur.

Le liquide frigorigène froid traverse un deuxième échangeur (appelé évaporateur) dans lequel circule le fluide extérieur source (air, eau de nappe, eau échangeant avec un capteur enterré pour la PAC ou air intérieur du réfrigérateur) qui est plus chaud que le liquide frigorigène. Celui-ci récupère l'énergie thermique du fluide extérieur. Le liquide entre alors en ébullition et se transforme en gaz (d'où le nom d'évaporateur). Le gaz ainsi formé est aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle.

Exemple de liquide frigorigène : fréon, CFC ou HCFC : Température de vaporisation du fréon : -26°C à 1 bar.

Efficacité énergétique

Elle sera vue différemment selon l'objectif souhaité :

Mode chauffage

COP = coefficient de performance

$$\text{COP}_{\max} \text{ (selon Carnot)} = \frac{\text{chaleur produite}}{\text{énergie fournie}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{R_{\max}}$$

Le COP peut aller jusqu'à 7.

Mode climatiseur ou réfrigérateur

EER = coefficient d'efficacité frigorifique

$$\text{EER}_{\max} = \frac{\text{chaleur évacuée}}{\text{énergie fournie}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

ne se déduit pas du rendement de Carnot

Pompe à Chaleur (PAC):

L'énergie thermique présente dans l'air, le sol, l'eau souterraine est une énergie disponible grâce au rayonnement solaire, aux vents et aux précipitations.

La pompe à chaleur permet de prélever cette énergie omniprésente (Source froide T_2) et de l'amener à un niveau de température plus élevé pour chauffer l'habitat (Source chaude T_1)

La pompe à chaleur peut sous certaines conditions ([air/air] en particulier) se transformer en climatiseur par inversion

Sur le même principe, le réfrigérateur et le congélateur domestiques prélèvent la chaleur dans les aliments à l'intérieur de l'appareil (source froide T_2) et la rejettent dans l'habitat (source chaude T_1)

Pour les réfrigérateurs, il existe aussi un procédé plus complexe, à deux fluides, ne requérant pas de compresseur : le réfrigérateur à absorption.

Les sources d'énergie pour les pompes à chaleur

L'air : une source d'énergie naturelle inépuisable qui n'est soumise à aucune autorisation d'utilisation.



L'eau : Puiser de l'eau dans une nappe phréatique est soumis à autorisation administrative.



Le sol : capteurs horizontaux ou verticaux

Au delà de plusieurs dizaines de centimètres, la température du sol varie peu, quelle que soit la période de l'année, même dans les régions froides. Les couches supérieures agissent comme un isolant.



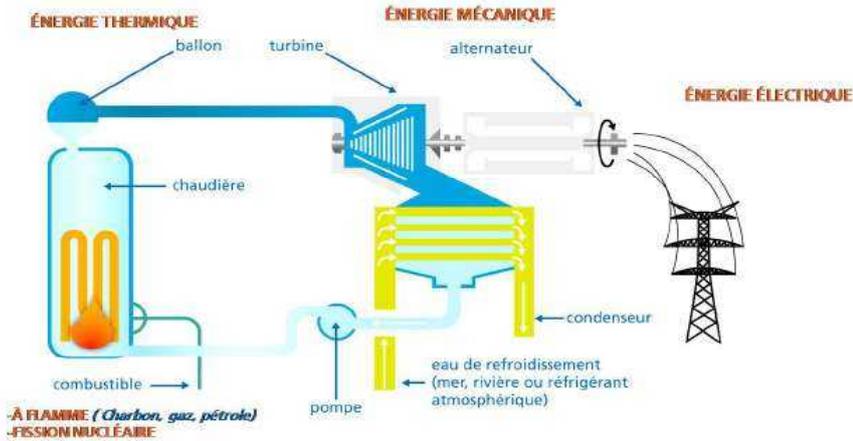
Capteurs enterrés horizontalement



Capteurs enterrés verticalement

La vapeur, encore et toujours !

La vapeur : principal agent utilisé pour la production d'électricité



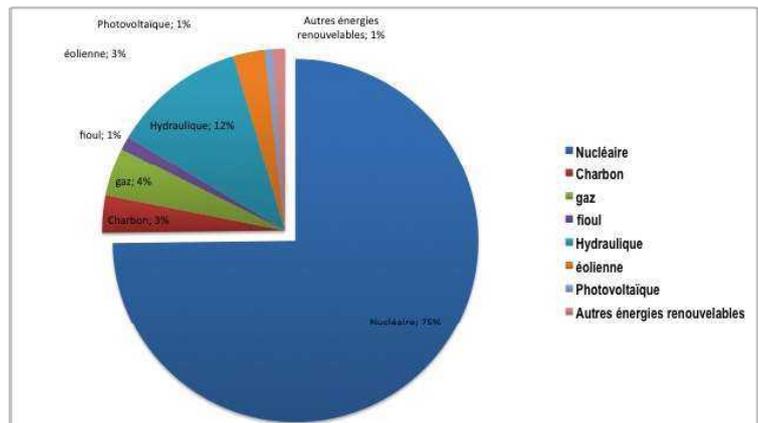
Grâce à une combustion ou à une réaction de fission, on produit de la vapeur haute pression dont la détente provoque la rotation d'une turbine. Celle-ci est accouplée à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le rendement des machines thermiques est limité par la pression maximale admissible dans la chaudière ce qui fixe la température haute de la vapeur. Les maxima sont imposés par les conditions de sécurité des biens et des personnes.

La vapeur est actuellement incontournable dans la production d'électricité.

En 2012, la production nette d'électricité est de 540 TWh soit 540 000 millions de KWh. La production se répartit de la façon suivante :

La forme de réponse aux besoins d'énergie électrique interroge dans le cadre du développement durable.



Production d'électricité 2012 (TWh) en France

Évolution du rendement des machines thermiques

Machine	Pression Vapeur (Bars)	Température Vapeur Haute en °C	Rendement théorique* maximum	Rendement réel *	Puissance d'une ligne
Machine de Denis Papin	1 +	110	0,02		
Maquette Vapeur vive	1 +	120	0,05		
Locomotive 241 P 17	20	210	0,23	0,15	3000 kW
Moteur à explosion		1500	0,50	0,4	
Turbine dans une centrale à flammes	180	540	0,63	0,4	700 MW
Turbine dans une centrale nucléaire	80	300	0,47	0,3	1450 MW
Chaudière hautes performances expérimentales	250	600	0,65	0,45	

* Le rendement réel ne peut être qu'inférieur au rendement théorique ; ceci est dû aux consommations d'énergie parasite dans les machines.
 - fluides thermiques (déperdition de chaleur)
 - pertes de charge liées à la circulation des fluides
 - frottements dans les organes mécaniques
 - autres pertes.

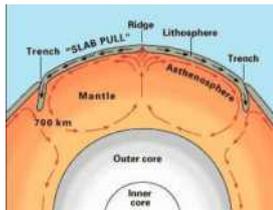
S'éloigner de l'équilibre : transmettre la chaleur

La chaleur : énergie transmise

Sadi Carnot écrit dans le premier paragraphe de son ouvrage « **Réflexions sur la puissance motrice du feu** ».

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

C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre ; c'est à elle que sont dues les agitations de l'atmosphère, l'ascension des nuages, la chute des pluies et des autres météores, les courants d'eau qui sillonnent la surface du globe et dont l'homme est parvenu à employer pour son usage une faible partie ;



enfin les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, reconnaissent aussi pour cause la chaleur. »

Rouleaux dans le manteau terrestre



Transition Conduction-Convection

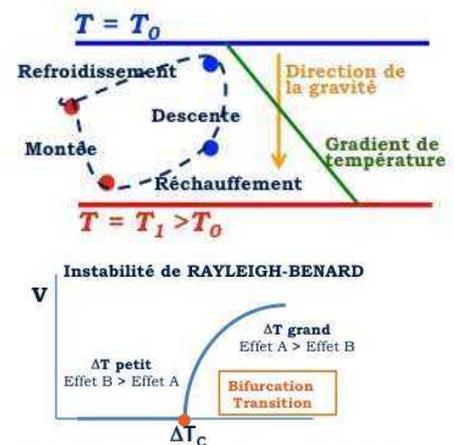
Pourquoi ces rouleaux convectifs : examinons la situation d'une couche fluide (gaz, liquide) chauffée par le bas. Peut-elle rester immobile ?

Un changement d'état se fait dans des conditions données et pour un fluide donné à une valeur précise de l'écart à l'équilibre. C'est une **transition** ou encore une **bifurcation**.

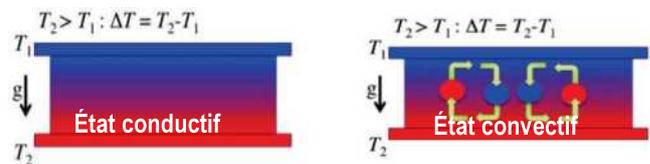
Effet A : Le gradient de température est opposé à l'effet de la gravitation. Comme le système est chauffé par le bas, on trouve les zones chaudes en bas et froides en haut. Or une petite région de fluide chaude est moins dense qu'une petite région froide. Elle aura donc tendance à remonter alors que les zones vont descendre, sous l'effet de la gravitation. Ceci explique la convection (mise en mouvement du fluide).

Effets B : Mais d'une part, le fluide est visqueux donc résistant au mouvement et d'autre part, la chaleur est conduite vers la partie froide donc la partie chaude se refroidit.

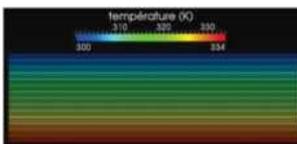
Représentation schématique de la vitesse convective d'un fluide au voisinage du seuil de l'instabilité de Rayleigh-Benard



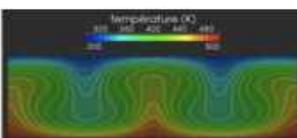
Si ΔT s'accroît fortement, la théorie prévoit que dans un fluide, l'état de conduction thermique peut ne pas être maintenu et apparaît alors la mise en mouvement du fluide par convection : effet **Rayleigh-Benard**



État de référence stable
État conductif

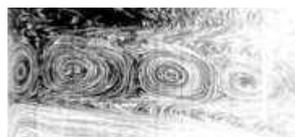


Transition



État de référence instable,
État convectif

Résultats de simulations numériques



Rouleaux de convection expérimentaux vus de profil



Cellules de convection hexagonales vues du dessus induites par les variations de tension superficielle. Instabilité de Bénard-Marangoni

L'accroissement de l'écart de température ΔT autrement dit de l'écart à l'équilibre, provoque au-delà d'un point critique, l'**instabilité** de l'état **conductif** de la chaleur (Loi de Fourier) et provoque la mise en place d'un état nouveau, inédit, qui se substitue au précédent. Cet **état convectif** caractérisé par des rouleaux périodiques dans l'espace est **structuré**. Cette structure de non-équilibre appartient à la famille des **structures dissipatives décrites par Ilya Prigogine, Prix Nobel de chimie 1977**.

Dans notre cas, la structure est générée par une dissipation suffisante, ici la **chaleur**.

S'éloigner de l'équilibre : Chimie : Rythmes et formes

Nous avons examiné en détail les situations que le transfert de chaleur suscite.

Il s'agit ici d'un phénomène irréversible particulier, mais il y en a d'autres notamment :

- la diffusion de la matière,
- le courant électrique
- la réaction chimique

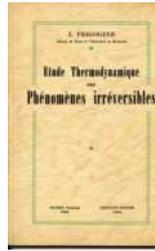
Bien se souvenir que

Le maintien des systèmes hors d'équilibre nécessite **des échanges de matière et (ou d'énergie)...** et d'entropie **avec l'environnement.** ; ce sont des **systèmes ouverts.**

Dans ces conditions, les systèmes révèlent des comportements nouveaux, inédits par rapport à ceux que prévoit l'équilibre.

Sinon, écartés de l'équilibre, ils y reviennent.

Thermodynamique généralisée dite des processus irréversibles.



Cette thermodynamique résulte des travaux de École de Bruxelles (Théophile De Donder, Rayond Defay, Ilya Prigogine, Paul Glansdorff...

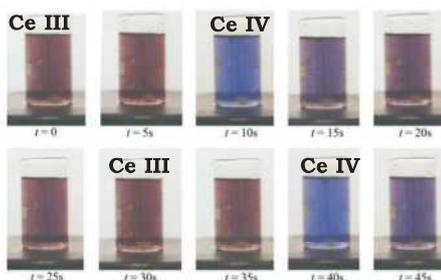


Ilya Prigogine

Un cristal de quartz, un lingot d'or ne nécessitent aucun échange de matière ou d'énergie pour survivre. Ce sont des structures d'équilibre.

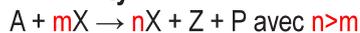
Loin de l'équilibre :

Réactions oscillantes en milieu homogène rythmes



Réactions chimiques couplées à la diffusion

• Les réactions doivent contenir un germe d'instabilité. Présence d'une **autocatalyse**



• Le signal chimique local doit-être transmis par **diffusion et la diffusion des espèces chimiques doit être différenciée.**

Naissance de structures dissipatives Auto-Organisation



1921 : William Bray (1879-1946) première description d'un oscillateur chimique isotherme : Cette découverte a été rejetée par les scientifiques de l'époque arguant une impossibilité thermodynamique !!!

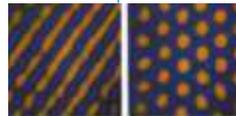
1951 : Boris Belousov (1893-1970) chimiste russe découvre une réaction oscillante mais ses travaux sont à nouveau rejetés... et il ne peut les publier qu'en 1958 (Prix Lénine posthume en 1980).

1961 : Observation reprise par **Anatol Zhabotinski** (1938-2008), il y ajoute la découverte d'ondes circulaires et spirales. Avec la Thermodynamique hors d'équilibre (travaux de **Ilya Prigogine** 1966) les oscillations chimiques deviennent compréhensibles,

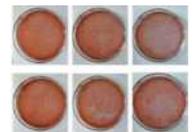
Ce sont **les structures dissipatives.**

1974 : Richard Noyes établit un modèle cinétique (**l'oregonateur**)

Structures spatiales



Ondes spatiotemporelles



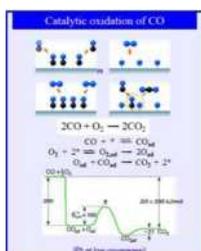
Réaction de Belousov-Zhabotinski (BZ)
Bromate + acide malonique +catalyseur
(cérium, ferroïne) + acide sulfurique

Le mathématicien **Alan Turing** (1912-1954), un des pères de l'ordinateur, du codage (cryptage) et de la biologie théorique avait prédit dès 1952 de telles structures (dites aujourd'hui Structures de Turing)

On parle **de morphogénèse** (naissance des formes)

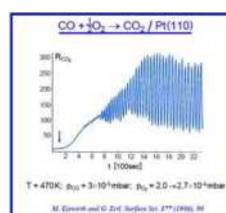
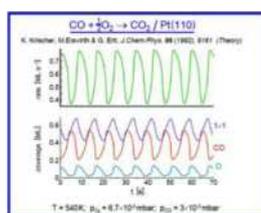
Prouvée expérimentalement par une équipe de Bordeaux en **1990.**

Catalyse et réactions de surface



* = site d'adsorption

M_{ads} = molécule adsorbée



Oxydation catalytique du monoxyde de carbone CO sur une surface de platine



Gerhardt Ertl

Prix Nobel de Chimie 2007

Études des réactions chimiques sur les surfaces solides

Des moteurs thermiques aux structures dissipatives

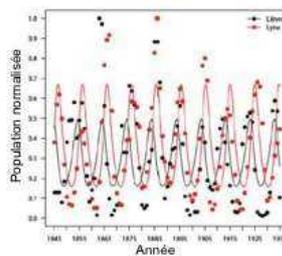
Biologie



Extrait d'une présentation de Patrick de Kepper

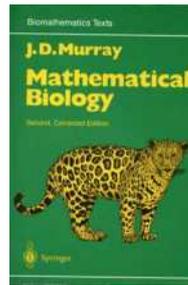
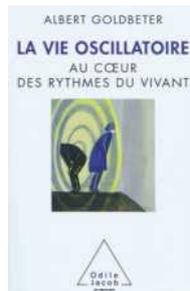
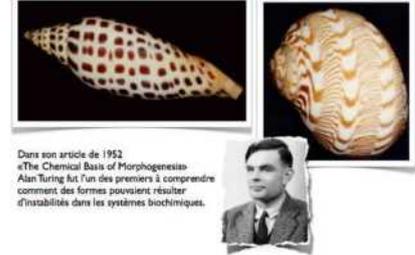
Système proies-prédateurs Lièvre-Lynx

Système proies-prédateurs Lièvre-Lynx



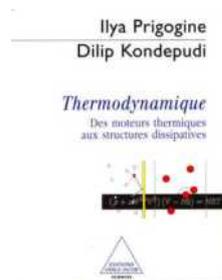
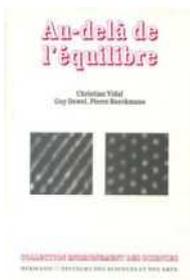
Structure du monde vivant : pelages, coquillages...

Les motifs sur les coquillages :



Extrait d'une présentation de Patrick de Kepper

Au terme de ce parcours, suscité par l'œuvre fondatrice de Sadi Carnot, il apparaît que la dynamique (ou la cinétique) génère des structures dans le temps et dans l'espace. « Ces structures peuvent spontanément briser la symétrie de leur environnement. Ces structures ne se développent que loin de l'équilibre. » (Patrick De Kepper)



« Ce phénomène d'auto-organisation est une **propriété universelle** (générique) de systèmes physiques ou biologiques très différents, évoluant loin de l'équilibre, qui peuvent présenter des organisations analogues.

Ce qui les unit c'est la classe d'universalité des non linéarités au sens mathématique ! » (Patrick De Kepper)

Sadi Carnot donne une conclusion incroyablement moderne à son ouvrage !

« On ne doit pas se flatter de mettre jamais à profit, dans la pratique, toute la puissance motrice des combustibles. Les tentatives que l'on ferait pour approcher de ce résultat seraient même plus nuisibles qu'utiles, si elles faisaient négliger d'autres considérations importantes. **L'économie du combustible** n'est qu'une des conditions à remplir par les machines à feu ; dans beaucoup de circonstances, elle n'est que secondaire, elle doit souvent céder le pas à **la sûreté, à la solidité, à la durée de la machine, au peu de place qu'il faut lui faire occuper, au peu de frais de son établissement, etc.**

Savoir apprécier, dans chaque cas, à leur juste valeur, les considérations **de convenance et d'économie** qui peuvent se présenter, **savoir discerner** les plus importantes de celles qui sont seulement accessoires, les balancer toutes convenablement entre elles, afin de parvenir par les moyens les plus faciles au meilleur résultat, tel doit être **le principal talent de l'homme** appelé à diriger, à coordonner entre eux les travaux de ses semblables, à les faire concourir vers un but utile de quelque genre qu'il soit. »

Et comparons au Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale n°6 du 28 août 2008

Thème 3 de convergence

« Le terme **énergie** appartient désormais à la vie courante. Quelles ressources énergétiques pour demain ? Quelle place aux énergies fossiles, à l'énergie nucléaire, aux énergies renouvelables ? Comment transporter l'énergie ? Comment la convertir ? Il s'agit de grands enjeux de société qui impliquent une nécessaire formation du citoyen pour participer à une réflexion légitime. Une approche planétaire s'impose désormais en intégrant le devenir de la Terre ».

Programme de Technologie de 4^{ème}

Il s'agit d'identifier les différents types d'énergies exploités dans le fonctionnement de l'objet technique et de comprendre que le choix des énergies est lié à des contraintes techniques, humaines et économiques. Cette approche conduit l'élève à une sensibilisation aux problèmes environnementaux et au développement durable. Elle éclaire le fonctionnement de l'objet technique en abordant la distribution et la gestion de l'énergie (efficacité énergétique) dans les objets techniques en prenant en compte les conséquences économiques, sociales et environnementales.

Fondation Carnot



Sous l'égide de la Fondation de France
Dédiée à la mémoire de Mr. Lazare Carnot
(1903 - 1990)

Les objectifs

- Perpétuer la contribution de la famille Carnot aux valeurs humaines.
- Transmettre l'héritage intellectuel et moral d'une famille qui a marqué un siècle de l'histoire de la France.
- Favoriser le rayonnement de la culture et de la formation scientifique française dans le monde.

Les activités

Bourses scientifiques à destination de l'Université de Bourgogne et de l'École Polytechnique

Plusieurs bourses sont attribuées chaque année à des étudiants de l'École Polytechnique et à des docteurs ès sciences de l'Université de Bourgogne.

Plus que des bourses, la Fondation offre une aide sur le long terme à l'orientation de carrière avec la création d'un réseau de mentors et d'une association des anciens boursiers destinés à guider les nouveaux dans l'évolution de leur vie professionnelle. C'est ainsi, depuis 1997, plus d'une trentaine de diplômés de l'École Polytechnique et une vingtaine de docteurs en Physique ou Chimie de l'Université de Bourgogne qui ont pu bénéficier du soutien de la Fondation.

Bourses à des diplômés de l'Institut National du Patrimoine

Des bourses annuelles sont également octroyées à des Conservateurs et à des Restaurateurs du Patrimoine, diplômés de l'Institut National du Patrimoine.

Publications

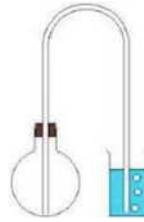
En 1999, la Fondation a créé la Collection Carnot pour récompenser des auteurs, par un prix et la publication de leur œuvre au sein de la Collection Carnot. Après 10 ans et 28 livres publiés, la collection continue à vivre sans notre aide sous la responsabilité des Presses Universitaires de Rennes et d'un comité composé d'historiens.

Chaire d'Histoire du Patrimoine Technique et Industriel à l'École du Louvre

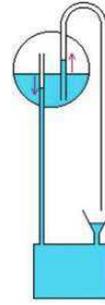
Par un financement s'étalant sur 6 ans dès la rentrée 1997-98, la Fondation a permis la création de cette chaire ayant pour vocation de former des jeunes aptes à exercer leurs activités professionnelles dans le monde des musées ou des sites illustrant des savoir-faire et des techniques souvent disparus.

Autour de Sadi Carnot, de la chaleur à la thermodynamique

Philon de Byzance (fin du III^{ème} siècle avant J.C.)
Exposé au soleil puis à l'ombre, l'eau monte dans le tuyau



Héron d'Alexandrie (170-117 av. J.C.)
Après exposition au soleil, l'eau monte dans le tube en U et peut se déverser dans l'entonnoir.
Mis à l'ombre on revient à l'état initial, la dilatation des gaz pouvait servir à estimer la température.

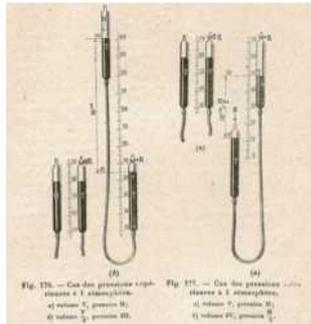


Loi de Boyle-Mariotte

A température constante, le produit du volume V du gaz par sa pression P est constant. $PV = Cte$



Robert Boyle (1672-1684)



Edmé Mariotte (1620-1684)



Guillaume Amontons (1663-1705)

La température d'ébullition de l'eau reste constante.



Edmund Halley (1656-1742)



Ole Römer (1644-1710)

Ole Römer étalonne un thermomètre à alcool à partir de la fusion de la glace et de l'ébullition de l'eau, il divise l'intervalle en 60 degrés.



Réaumur (1683-1757)

Réaumur divise l'intervalle en 80 parties.



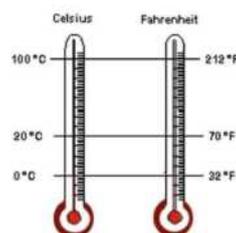
Fahrenheit (1686-1736)

Fahrenheit propose une autre échelle.



Celsius (1701-1744)

Celsius propose l'échelle utilisée aujourd'hui, l'intervalle est divisé en 100 parties.



comparaison simplifiée



Le coefficient de dilatation est le même pour tous les gaz

Pierre Louis Dulong (1785-1838)



«De nombreux gaz se dilatent par les mêmes degrés de chaleur»

Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850)



Louis Jacques Thénard (1777-1857)



Théorie de la propagation de la chaleur

Joseph Fourier (1768-1830)



Le calorique

Herman Boerhave (1668-1738)



Notion de chaleur spécifique

Joseph Black (1728-1799)

Loi de Dulong et Petit : Le produit de la masse atomique d'un corps simple à l'état solide par sa chaleur spécifique à pression constante est généralement voisin de 6,2 calories aux températures ordinaires.

La chaleur latente



James Watt (1736-1819)

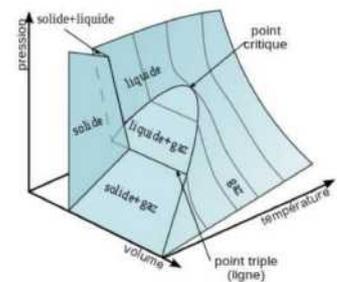
$$L = T \Delta V \frac{dP}{dT}$$

ΔV est la variation de volume

dP est la variation de pression d'équilibre P correspondant à une variation dT de T

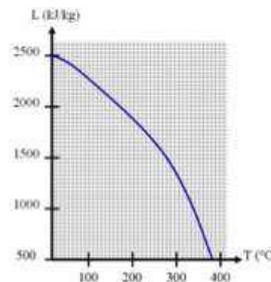
La variation d'entropie liée au changement de phase est :

$$\Delta S / \Delta V = dP/dT$$



Surface d'état d'une substance normale

Chaleur latente de vaporisation : Avec une puissance $P=340$ Watts
Il faut $\Delta t=140$ secondes pour vaporiser $m=20$ grammes d'eau
 $L=P \times \Delta t / m$
 $L=2380 \text{ kJ/kg}$



La machine à vapeur



Blaise Pascal (1623-1662)

Existence du vide avec Blaise Pascal



Otto de Guericke (1602-1686)

Les hémisphères de Magdebourg



Denis Papin (1647-1712)

Le digesteur = la cocotte - minute



Chemin de fer pneumatique



Thomas Newcomen (1663-1729)

Première machine à pompage atmosphérique





1784 Aérostat de l'Académie de Dijon avec Guyton de Morveau

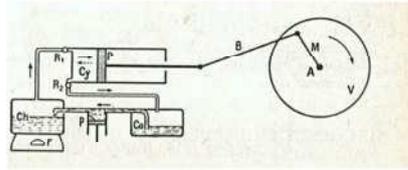


Schéma de la machine à vapeur



La théorie du Phlogistique

Georg-Ernst Stahl (1660-1734)



La nomenclature chimique

Lavoisier (1743-1794)



Lorsqu'on fore l'âme d'un canon, il se dégage beaucoup de chaleur et c'est par le travail que la chaleur se dégage et non d'un stock de « calorique » emmagasiné dans le métal.

Benjamin Thompson, comte de Rutherford (1753-1814)



Début de l'équivalence travail - chaleur

Humphrey Davy (1778-1829)



1824 «Réflexions sur la puissance motrice du feu»

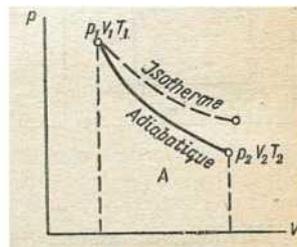


«la puissance motrice de la chaleur»

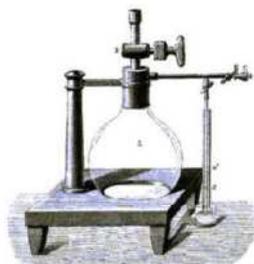
Émile Clapeyron (1799-1864)



Gabriel Lamé (1795-1870)



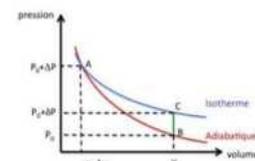
Isotherme $PV=Cte$
Adiabatique $PV^\gamma=Cte$



Expérience de Clément et Désormes

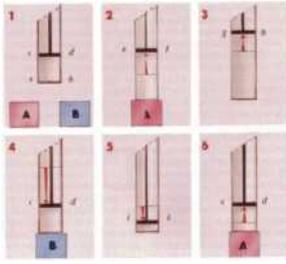


Mesure de γ

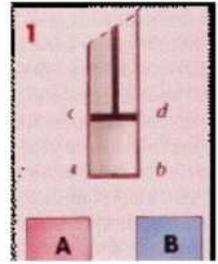


$$\gamma = \frac{\Delta P}{\Delta P - \delta p}$$

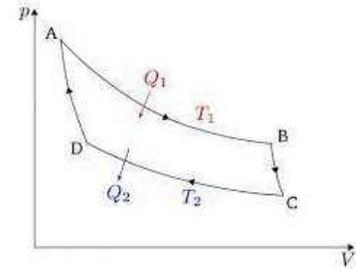
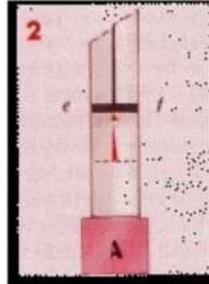
Diagramme de Carnot-Clapeyron



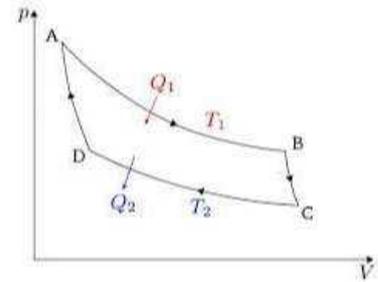
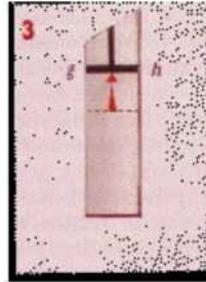
Le corps A est mis en contact avec l'air enfermé dans abcd ou avec la paroi abcd qui peut transmettre de la chaleur ; Sadi disait le calorique. L'air va se trouver à la même température T_1 , cd est la position première du piston.



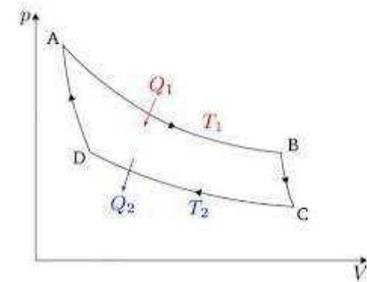
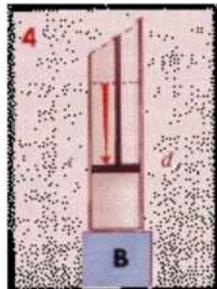
Le piston se déplace graduellement jusqu'en ef, il faut chauffer pour maintenir la température T_1 constante, ce qui coûte en énergie mais il se produit un travail durant cette phase qui correspond à la partie isotherme AB dans le diagramme de Clapeyron.



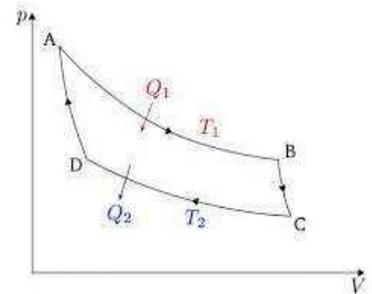
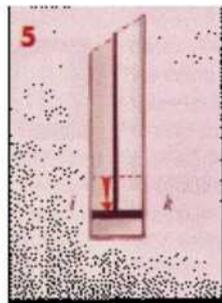
Le corps A est alors éloigné, on coupe le chauffage par exemple. On a alors une détente adiabatique, on ne brûle pas de combustible, la machine va toujours fournir du travail mais par contre la température s'abaisse, le gaz se refroidit. La température va pouvoir atteindre la valeur T_2 de B et le piston arrive en gh (courbe adiabatique BC).



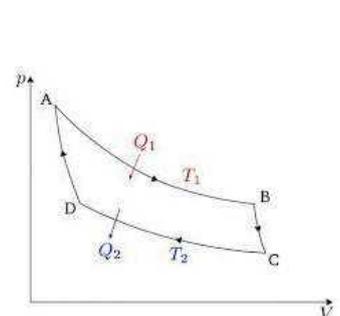
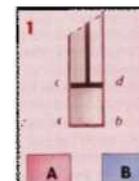
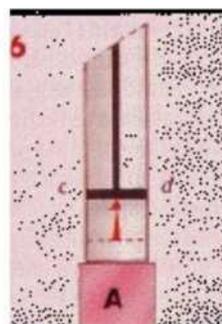
L'air est mis en contact avec le corps B, il est alors comprimé par le retour du piston qui arrive alors en cd. Pendant toute cette marche, la température est constante et égale à T_2 mais l'air qui était au départ à une température supérieure va céder de la chaleur à la source froide maintenue à T_2 . On a donc une compression isotherme (courbe CD).



Le corps B est maintenant écarté, la compression se poursuit mais la température s'élève dans une compression adiabatique sans échange de chaleur avec l'extérieur. L'air va atteindre la température T_1 et le piston arrive à la position ik (partie adiabatique DA).



L'air est remis en contact avec le corps A ; le piston retourne à la position cd puis à la position ef, la température est alors invariable. Le cycle a recommencé



Rendement d'une machine thermique

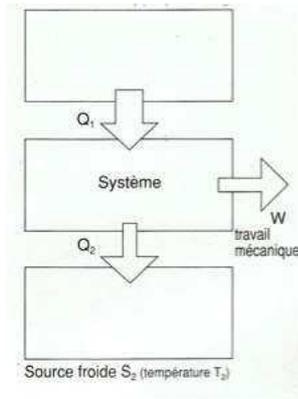
Source chaude S_1 (température T_1)

$$n = (T_1 - T_2) / T_1$$

T est la température absolue en degrés Kelvin

$$T = 273^\circ + t^\circ\text{C}$$

Source froide S_2 (température T_2)



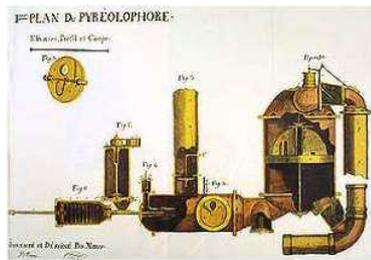
Avec Sadi Carnot, vers la machine à vapeur idéale vers d'autres moteurs...

Sadi Carnot a « bon espoir » que l'air puisse cependant avoir une supériorité remarquable sur la vapeur d'eau.

Sadi Carnot mentionne la machine à combustion interne des frères Niépce : le Pyrèolophore : premier moteur à combustion interne ainsi que les essais heureux en Angleterre (1816) d'une machine produisant la puissance motrice avec un chauffage extérieur.. Moteur Stirling ou à air chaud ?



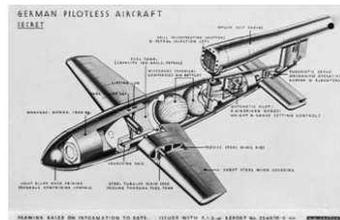
Pyrèolophore



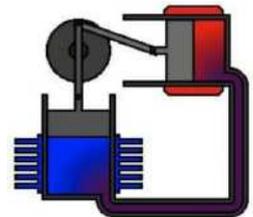
Bateau « Tac-tac »



Missile V1 (1939-1945) Pulsoréacteur



Machine de Stirling



Avec Sadi Carnot vers le premier principe de la thermodynamique

1832, à la mort de Sadi Carnot, son frère Hippolyte fait disparaître beaucoup de documents.

1878, son neveu Adolphe, fils d'Hippolyte remet des documents à l'Académie des Sciences sous le titre : « Notes sur les mathématiques, la physique et autres sujets » vraisemblablement rédigées entre 1824 et 1832. Il apparaît nettement que Carnot a bien énoncé le premier principe de la thermodynamique.



Sadi Carnot



Hippolyte Carnot



Adolphe Carnot

Alfred Kastler (1902-1984) prix Nobel de Physique 1966



L'œuvre posthume de Carnot (Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique)

Feuillet 3 : « lorsqu'une hypothèse ne suffit plus à l'explication des phénomènes, elle doit être abandonnée... C'est le cas où se trouve l'hypothèse par laquelle on considère le calorique comme une matière, comme un fluide subtil... »

Feuillet 7 : « La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme ; c'est un mouvement ...on peut poser en thèse générale que la puissance motrice est en quantité invariable dans la nature, qu'elle n'est jamais, à proprement parler ni produite, ni détruite ; à la vérité, elle change de forme, c'est-à-dire qu'elle produit tantôt un genre de mouvement, tantôt un autre, mais elle n'est jamais anéantie » c'est l'une des formes du premier principe.

Vers le 4,18 Joules

Feuillet 8 « D'après quelques idées que je me suis formées sur la théorie de la chaleur, la production d'une unité de puissance motrice nécessite la destruction de 2,70 unités de chaleur ».

L'unité de travail de Carnot était 1000 kgm et l'unité de chaleur égale à une kilocalorie(Cal) , l'équivalent mécanique de la calorie est de
 $1000 : 2,70 = 370 \text{ kgm/Cal}$.

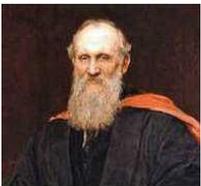
La valeur qui sera admise sera de 427 kgm/Cal .

Comme 1 kgm vaut 9,81 Joules, on trouve que l'équivalent mécanique trouvé par Carnot était de 3,63 Joules/calorie au lieu du 4,18 Joules/cal

Vers la confirmation des travaux de Sadi Carnot...



En 1842, **Julius Mayer** (1814-1878) médecin et physicien publie un article dans les annales de chimie, dans lequel il attribue une valeur à l'équivalent mécanique de la chaleur. Son étude reposait sur l'augmentation de la température dans la pâte à papier agitée par un mécanisme motorisé. Julius Mayer fut aussi le premier à l'époque à énoncer le principe de la conservation de l'énergie.



Lord Kelvin

Après les travaux de Clapeyron, en 1845, William Thomson (1824-1907) plus connu sous le nom de Lord Kelvin découvre à Paris l'œuvre de Sadi Carnot et il va proposer la nouvelle échelle de température absolue et introduire le rendement d'une machine thermique.



James Prescott Joule (1818 -1889) comprend définitivement à partir de 1845 que la chaleur doit être équivalente à un travail mécanique, il montre aussi que lorsqu'un gaz travaille en poussant un piston, il refroidit et il mesure l'équivalent mécanique de la calorie après Carnot et Mayer.



Équivalent mécanique de la calorie

$$\text{Valeur en eau de l'appareillage } E_Q = \sum_i m_i \times C_{mi} = 16,4 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Chaleur massique C_m (cal/g/°C)

- Eau : 1 $m_{\text{eau}} = 3\text{g}$
- Éthanol : 0,588 $m_{\text{éth}} = 0,27\text{g}$
- Cuivre: 0,092 $m_{\text{cu}} = 3,9\text{g}$
- Laiton : 0,090 $m_{\text{lai}} = 143\text{g}$

Puissance mécanique de frottement $P_{\text{frot}} = 2 \times \pi \times N \times C$

- N vitesse rotation (1000t/s)
- C couple freinage (0,048Nm)

$$\text{Élévation de température } \Delta t = 10^\circ\text{C} \quad E_{\text{thermique}} = E_Q \times \Delta t = 164\text{cal}$$

Régime permanent de frottement pendant $\delta t = 150\text{s}$

$$E_{\text{mécanique}} = 2\pi N C \delta t = 764\text{J}$$

$$E_{\text{mécanique}} / E_{\text{thermique}} = 764/164 = 4,66$$



L'entropie



En 1850, **Rudolf Clausius** (1822-1888) montre que le principe de Carnot n'est pas lié à l'indestructibilité de la chaleur et qu'il s'accorde avec le principe de l'équivalence et il introduit la notion d'entropie pour laquelle seules les variations auront un sens :

$$dS = dQ / T$$

Le troisième principe de la Thermodynamique



Walther NERNST (1864-1941) montrera que l'entropie d'un corps est nulle au zéro absolu mais c'est une autre histoire !

Conclusion



24 janvier 1683, 142 ans avant Sadi Carnot, Jean de la Fontaine avait publié un poème à la gloire du quinquina à la demande de la duchesse de Bouillon et décrit l'Eolipile d'Héron d'Alexandrie :

*L'eau qui reste en l'Eolipile
Ne se refroidit pas quand il devient moins plein
L'airain soufflant fait voir que la liqueur enclose
Augmente de chaleur, déchuée en quantité*



Formule de Duperray

$$P_{atm} = (t_c/100)^4$$



P_{atm}	t_c	$(t_c/100)^4$
1	100	1
1,5	111	1,52
1,7	114,6	1,725

Sources bibliographiques par panneau

Panneau 1 : Discours de Emile Picard(1) et de Jean Perrin(2) à l'occasion de l'inauguration de la plaque commémorative posée au Palais du Petit Luxembourg le 8 juillet 1932 ; Introduction de Louis Leprince-Ringuet(3) pour le 150ème anniversaire de la parution du mémoire de 1824, en 1974 à l'École Polytechnique

(1) : Mathématicien, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences en 1917

(2) : Physicien, chimiste, Prix Nobel de Physique en 1926

(3) : Physicien, membre de l'Académie Française et des Sciences

Panneaux 2 et 5 : Site de la Fondation Carnot ; Sadi Carnot, physicien et les « Carnot » dans l'histoire –André Fridberg 1973 Ed La pensée universelle ; Physiciens en Bourgogne, Michel Pauty ; Carnot de Daniel Amson ; Château de Larocheport, L'esprit médiéval de Sylvie Carnot, Laurent Saccaro et David Bordes ; Le fonds Carnot, par Monsieur Kharaba, bulletin de l'Académie François Bourdon.

Panneaux 3 et 4 : «La révolution au pays de Lazare Carnot» de Andrée et Jean Tillequin ; Mémoires sur Carnot par son fils, Hippolyte Carnot 1864, Paris Pagnerre, Libraire-éditeur tomes 1 et 2.

Panneau 8 : « A toute vapeur » de l'institut Claude Nicolas Ledoux et de l'Académie François Bourdon et de la Division Thermodyn de Framatome; Wikipédia ; Les Cahiers de Science et Vie, Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique CNRS édition 1/09/1998.

Panneaux 14 : JL Marignier et M Bonnet : "Niépce, correspondance et papiers" édité par la maison Niépce.

Panneaux 15, 16, 17, 18 : Physique Classe de mathématiques : CESSAC et TREHERNE ; Ed Nathan 4T 1962 ; AFPA : Association Française pour les Pompes à Chaleur ; Wikipédia ; EDF.

Panneau 21 : Présentation de P. De Kepper, collège de France 16 janvier 2007.

Liste des contributeurs scientifiques, historiques et techniques :

Christian Baron (Panneau 1). Florence Baras (Panneaux 5, 9, 10, 19, 20, 21). Gilles Bertrand (Panneaux 5, 11, 12, 13, 19, 20, 21). Odile Bertrand (Panneaux 5, 11, 12, 13, 19, 20, 21). Jean Louis Bruley (P 14). Claude Chevalier (Panneaux 1, 2, 4, 5). Jean Yves Chevalier (Panneaux 8, 15, 16, 17, 18). Romain Chevalier (Panneaux 15, 16, 17). Maryse Comble (Panneaux 2, 4). M.Graf, (Panneau 3). Alain Guillemain (Panneaux 1, 2, 4). Michel Jannin, (Panneaux 6, 7). Jurgen Löw, (Panneau 3). Sophie Magniez (production CCSTI). Jean Guy Monnot (Panneaux 2, 4, 8, 15, 16, 17, 18). Michel Pauty (Panneaux 6, 7). Christophe Finot (Panneau 22). Marcel Vilz (Panneau 3). Serge Waszak (production CCSTI).

Crédits photos et illustrations :

Musée de la Vie Bourguignonne-Perrin de Puycousin, Dijon (cliché François Perrodin).

Bibliothèque du patrimoine : Bibliothèque municipale de Dijon, cl. E. Juvin.

©Collection École polytechnique – Palaiseau

X2B 10 Rapports du Conseil de perfectionnement de l'École polytechnique (1810-1819)

Fonds Carnot, Collection Académie François Bourdon-Le Creusot ».

Liste des ouvrages consultés à la bibliothèque d'étude de Dijon (rue de l'école de droit):

- L'accueil des idées de Sadi Carnot et la technologie française de 1820 à 1860 par Pietro Redondi Paris : J. Vrin 1980

- Carnot et la machine à vapeur par Jean Pierre Maury, Paris Presses Universitaires de France 1986

- L'œuvre scientifique de Sadi Carnot : introduction à l'étude de la thermodynamique, E. Ariès, Paris Payot 1921

- Sadi Carnot, 1796-1832 : réflexions sur sa vie et la portée de son œuvre, Victor Mihailovich Brodiansky traduit par Alexandre Goriatchev, Presses universitaires de Perpignan 2006.

- Sadi Carnot(1796-1832) le fondateur de l'énergétique : ses origines, sa vie . G. Simon p. 244-250 Annales de Bourgogne tome 4, 1932.

- Sciences Physiques : de Carnot à Prigogine- ENS Fontenay aux Roses 1980 (les cahiers de Fontenay ; 18).

Bibliographie : Physiciens en Bourgogne, Michel Pauty, CCSTI de Bourgogne, 2005 -Au-delà de l'équilibre, Christian Vidal, Guy Dewel, Pierre Borckmans, Hermann, 1994 Thermodynamique – Des moteurs thermiques aux structures dissipatives, Ilya Prigogine, Dilip Kondepudi, Odile Jacob, 1999 Carnot & la machine à vapeur, Jean-Pierre Maury, Presses Universitaires de France (Collection Philosophies), 1986 L'étonnante histoire de la machine à vapeur, Denis Morin, (BT. Bibliothèque de travail n°1143), 2002 Plein feux sur... la machine à vapeur, Isabelle Forlorou, Fanny Hermon-Duc, CNDP (TDC n°1018), 2011 Physique classe de mathématiques, J. Cessac et G. Treherne, Nathan 1962 Les atomes existent-ils vraiment ?, Bernard Diu, Odile Jacob, 1997 La vie oscillatoire, au cœur des rythmes du vivant, Albert Goldbeter, Odile Jacob (Sciences), 2010 Alan Turing - La pensée informatique, CRDP de l'Académie de Versailles (Doc Sciences n°14), 2012 Spécial développement durable, CNDP – Chasseneuil-du-Poitou, (Technologie n° 167), 2010 L'énergie de la Terre - Géothermie et biomasse, sources d'énergie pour l'humanité, Loïc Chauveau, Cherche-Midi (Le), 2010 Les Pompe à Chaleur, Bruno Béranger, Eyrolles, 2013 Du thermomètre à la température, Roger Lamouline, Ellipses Marketing (L'Esprit des Sciences), 2005 La chaleur et l'énergie, Nigel Hawkes, Gamma 69, (flash info), 1998 Histoire de l'industrie en France - du XVIe siècle à nos jours, Denis Woronoff, Seuil (Points Histoire), 1998 Mines et métallurgie, moteurs de l'industrialisation aux XVIIIe-XIXe siècles, Denis Woronoff, Historiens et géographes (Neuilly-sur-Seine), (Article de Périodique n°407, p. 95-111), 2009 Qu'est-ce que le patrimoine ?, CNDP (TDC n°1051), 2013 À l'école des Archives, Travailler en classe avec des documents patrimoniaux, sous la direction de Lydiane Gueit-Montchal, Scérén, CRDP Lorraine, 2010

Sitographie : www.science.gouv.fr <http://www.universcience.fr/accueil/> - <http://www.connaissancedesenergies.org/> - <http://www.afpac.org/> - www.nolay.com

Les énergies dans les programmes collèges et lycées

« L'énergie. L'énergie apparaît comme la capacité que possède un système de produire un effet : au-delà de l'usage familier du terme, un circuit électrique simple, la température d'un corps, les mouvements corporels et musculaires, l'alimentation, donnent à percevoir de tels effets, les possibilités de transformation d'une forme d'énergie en une autre, l'existence de réservoirs (ou sources) d'énergie facilement utilisables. De façon plus élaborée, l'analyse du fonctionnement des organismes vivants et de leurs besoins en énergie, la pratique des circuits électriques et leurs multiples utilisations dans la vie quotidienne, les échanges thermiques sont autant de circonstances où se révèle la présence de l'énergie et de sa circulation, le rôle de la mesure et des incertitudes qui la caractérisent. Le rôle essentiel de l'énergie dans le fonctionnement des sociétés requiert d'en préserver les formes aisément utilisables, et d'être familier de ses unités de mesure, comme des ordres de grandeur. Circulation d'énergie et échanges d'information sont étroitement liés, l'économie de celle-là étant dépendante de ceux-ci. » Introduction commune aux enseignements scientifiques et technologique - Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008

L'énergie est proposée comme thème 3 de convergence en lien avec les programmes.

« Le terme énergie appartient désormais à la vie courante. Quelles ressources énergétiques pour demain ? Quelle place aux énergies fossiles, à l'énergie nucléaire, aux énergies renouvelables ? Comment transporter l'énergie ? Comment la convertir ? Il s'agit de grands enjeux de société qui impliquent une nécessaire formation du citoyen pour participer à une réflexion légitime. Une approche planétaire s'impose désormais en intégrant le devenir de la Terre. » (BOEN n°6 du 28 août 2008)

Dans le programme de physique-chimie niveau 3^{ème}, sont abordés l'approche de l'énergie chimique (comment une pile électrochimique peut-elle être une source d'énergie ?), énergie mécanique, approche de l'énergie cinétique - de la centrale électrique à l'utilisateur. Des possibilités de production de l'électricité : quel est le point commun des différentes centrales électriques ? L'alternateur : comment produire une tension variable dans le temps ? (BOEN n°6 du 28 août 2008)

Dans le programme de sciences et vie de la terre niveau 5^{ème}, est abordé le fonctionnement de l'organisme et le besoin indispensable en énergie en s'appuyant sur l'exemple de l'Homme. (BOEN n° 6 du 28 août 2008)

Dans le programme de technologie niveau 4^{ème}, il s'agit d'identifier les différents types d'énergie exploités dans le fonctionnement de l'objet technique et de comprendre que le choix des énergies est lié à des contraintes techniques, humaines et économiques. Cette approche conduit l'élève à une sensibilisation aux problèmes environnementaux et au développement durable. Elle éclaire le fonctionnement de l'objet technique en abordant la distribution et la gestion de l'énergie (efficacité énergétique) dans les objets techniques en prenant en compte les conséquences économiques, sociales et environnementales. (BOEN n°6 du 28 août 2008) Remarque : le thème 2 de convergence dans l'introduction commune aux enseignements scientifiques et technologiques, est le développement durable.

Dans le programme d'histoire-géographie et éducation civique

niveau 4^{ème} : Le XIX^e siècle, thème 1 – L'âge industriel

« Le chemin de fer offre la possibilité, à partir de l'exemple d'une gare, de réfléchir aux innovations techniques, au développement des échanges, aux transformations du monde urbain. La série des Gare Saint-Lazare (Claude Monet) et l'Entrée d'un train en gare de La Ciotat (Frères Lumière) peuvent être d'excellents supports d'étude. Le combat des grandes sociétés permet de réfléchir au libéralisme. » (BOEN n°6 du 28 août 2008) *Ce qui permet une entrée pour l'histoire des arts.*

niveau 3^{ème} (histoire) : le thème 2 propose : L'évolution du système de production et ses conséquences sociales, ce qui permet d'aborder les deux révolutions industrielles.

niveau 3^{ème} (Géographie) : dans la partie II, Aménagements et développement du territoire français, thème 1 – Les espaces productifs.

La rencontre avec des professionnels du monde de l'entreprise, des laboratoires reste l'un des objectifs éducatifs de l'ouverture sur les métiers et les formations qui touchent à la fois la connaissance du monde des métiers, des voies de formations et la capacité à s'orienter tout au long de la vie. Lien : <http://eduscol.education.fr/cid50778/presentation.html>

Notions et contenus	Capacités exigibles
Gestion de l'énergie dans l'habitat	
Énergie interne ; température. Capacité thermique massique.	<ul style="list-style-type: none"> - Mesurer des températures. - Citer les deux échelles principales de températures et les unités correspondantes. - Associer la température à l'agitation interne des constituants microscopiques. - Associer l'échauffement d'un système à l'énergie reçue, stockée sous forme d'énergie interne. - Exprimer la variation d'énergie interne d'un solide ou d'un liquide lors d'une variation de température. - Définir la capacité thermique massique.
Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique, résistance thermique. Caractéristiques thermiques des matériaux.	<ul style="list-style-type: none"> - Prévoir le sens d'un transfert thermique entre deux systèmes dans des cas concrets ainsi que leur état final. - Décrire qualitativement les trois modes de transferts thermiques en citant des exemples. - Réaliser expérimentalement le bilan thermique d'une enceinte en régime stationnaire. - Expliciter la dépendance entre la puissance rayonnée par un corps et sa température. - Citer le lien entre la température d'un corps et la longueur d'onde pour laquelle l'émission de lumière est maximale. - Mesurer l'énergie échangée par transfert thermique.

Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011

Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie Classe terminale de la série scientifique Énergie, matière et rayonnement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Gestion de l'énergie dans l'habitat	
Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques Notions de système et d'énergie interne. Interprétation microscopique. Capacité thermique. Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique. Résistance thermique. Notion d'irréversibilité. Bilans d'énergie.	<ul style="list-style-type: none"> -Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques. Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé. Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique. Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces. Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

Agir ; Défis du XXI^{ème} siècle ; En quoi la science permet-elle de répondre aux défis rencontrés par l'Homme dans sa volonté de développement tout en préservant la planète ? Économiser les ressources et respecter l'environnement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Enjeux énergétiques Nouvelles chaînes énergétiques. Économies d'énergie.	<ul style="list-style-type: none"> -Extraire et exploiter des informations sur des réalisations ou des projets scientifiques répondant à des problématiques énergétiques contemporaines. Faire un bilan énergétique dans les domaines de l'habitat ou du transport. Argumenter sur des solutions permettant de réaliser des économies d'énergie.

<i>La nature du vivant</i>	
<i>Thème 1 - la Terre dans l'Univers, la vie et l'évolution du vivant : une planète habitée.</i>	
Connaissances	capacités et attitudes
<p>De nombreuses transformations chimiques se déroulent à l'intérieur de la cellule : elles constituent le métabolisme. Il est contrôlé par les conditions du milieu et par le patrimoine génétique.</p> <p>La cellule est un espace limité par une membrane qui échange de la matière et de l'énergie avec son environnement.</p> <p>Cette unité structurale et fonctionnelle commune à tous les êtres vivants est un indice de leur parenté.</p> <p>Objectifs et mots clés. On étudie un exemple.</p> <p>Mutant, organite, ordres de grandeur de tailles (cellule, organite, membrane). Distinction procaryote / eucaryote.</p> <p>(Collège. Membrane, noyau, cytoplasme ; information génétique, gène, allèle.)</p> <p>[Limites. Les réactions du métabolisme ; l'ultrastructure des organites ; la nomenclature des organites.]</p> <p>Convergences. Chimie : transformations chimiques.</p>	<p>Mettre en œuvre un raisonnement expérimental pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - montrer l'effet de mutations sur le métabolisme cellulaire et comprendre le rôle du génome ; - repérer l'influence de l'environnement sur le fonctionnement d'une cellule ; - comprendre les mécanismes d'une démonstration expérimentale : comparaisons, tests, témoins. <p>Réaliser une préparation microscopique et/ou utiliser des logiciels et/ou organiser et recenser des informations pour distinguer les échelles : atome, molécule, cellule, organe, organisme et les ordres de grandeur associés.</p> <p>Comparer des ultrastructures cellulaires pour illustrer la parenté entre les êtres vivants.</p>
<i>Thème 2 - Enjeux planétaires, contemporains : énergie, sol.</i>	
<p>L'énergie solaire est inégalement reçue à la surface de la planète.</p> <p>La photosynthèse en utilise moins de 1%. Le reste chauffe l'air (par l'intermédiaire du sol) et l'eau (ce qui est à l'origine des vents et courants) et évapore l'eau (ce qui permet le cycle de l'eau).</p> <p>Utiliser l'énergie des vents, des courants marins, des barrages hydroélectriques, revient à utiliser indirectement de l'énergie solaire. Ces ressources énergétiques sont rapidement renouvelables.</p> <p>La comparaison de l'énergie reçue par la planète et des besoins humains en énergie permet de discuter de la place actuelle ou future de ces différentes formes d'énergie d'origine solaire.</p> <p>Collège. Le cycle de l'eau.</p> <p>[Limites. Il s'agit seulement de proposer une vision globale, sans chercher à expliquer chacun des éléments de façon exhaustive. L'énergie nucléaire pourra simplement être signalée dans le cadre d'un panorama d'ensemble quantifié.]</p> <p>Convergences. Géographie, sciences économiques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Expérimenter, modéliser, extraire et exploiter des informations (documents météorologiques et/ou images satellitales et/ou documents océanographiques, etc.) et les mettre en relation pour comprendre l'effet de l'énergie solaire sur un exemple de circulation (atmosphérique ou hydrosphérique). <p>Construire une argumentation (de nature manipulative et/ou documentaire) pour montrer l'inégale répartition de la quantité d'énergie solaire reçue selon la latitude, et ses conséquences.</p>