

Jean Hrabovski

Coefficients & lois des climaticiens

Aide-mémoire technico-historique de
thermique du bâtiment par les noms des auteurs



Fresque « La fée électricité » de Raoul Duffy

Notre mission

Promouvoir l'innovation et les bonnes pratiques dans le domaine du génie climatique, tout en facilitant les échanges entre les professionnels et en formant les futures générations.

L'AICVF, Le réseau incontournable du génie climatique

Avec plus de 2 000 membres, l'AICVF rassemble des experts, ingénieurs, enseignants, chercheurs, industriels, bureaux d'études, énergéticiens, institutionnels, installateurs, exploitants, mainteneurs et décideurs autour des sujets du génie climatique. Depuis plus de 50 ans, nous accompagnons le secteur dans l'élaboration de règles de dimensionnement et de calcul, en intégrant les évolutions technologiques, tout en contribuant activement à l'évolution et à l'interprétation des réglementations pour répondre aux défis climatiques et énergétiques.



Trophée 2024, remise du prix.



Hors série CVC, magazine.



<https://aicvf.org/a-propos-de-laicvf>

Aide-mémoire technico-historique de thermique du bâtiment par les noms des auteurs

Les lois, formules et équations énoncées au fil des siècles par de grands physiciens sont aujourd'hui devenues des outils courants. Elles servent notamment au dimensionnement des installations de génie climatique et, depuis 1974, à la formulation des exigences des réglementations thermiques aujourd'hui élargies aux aspects environnementaux.

L'aide-mémoire technico-historique qui suit se veut un hommage à ces savants et techniciens pour l'héritage qu'ils nous ont transmis – même si, avouons-le, ils nous ont parfois donné du fil à retordre pendant nos années d'études.

Thalès de Millet

(VI^{ème} siècle avant JC)

On raconte qu'observant les étoiles sur lesquelles il développait des considérations astronomiques, Thalès tomba dans un trou. Une servante de Thrace en l'entendant se lamenter le raila en lui disant :

« Eh bien, Thalès, tu n'es pas capable de voir où tu mets les pieds et tu prétends connaître les choses du ciel. »



Origine : Exposition de photos de l'Atelier Mathieu Chévara à L'Ecole Normale Supérieure 2005. Thalès est interprété par Jean Hrabovsky

SOMMAIRE

En guise d'introduction : un « K » devenu « U », une longue histoire...	p.4
En avant-propos :	p.5
o Rappel de quelques définitions,	p.5
o Notations,	p.7
o De la RT à RE, les coefficients du climaticien,	p.8
o Réglementation du bâtiment. RE 2020, Climat et résilience	p.9
o Et pour les bâtiments existants ?	p.9
Les thermiciens et leurs attributs.	p.11
Liste de quelques attributs de thermiciens ou physiciens.	p.14
Attributs de thermiciens ou physiciens.	p.74
Et les femmes dans tout ça ?	p.75
Annexes	p.77
o Annexe A : les 7 unités de base du système SI.	p.77
o Annexe B : principales personnes morales du Génie Climatique.	p.79

Thermicien ou climaticien : quelle différence ?

THERMIQUE : ce qui a trait à la chaleur et à la température.

Le thermicien est un spécialiste de la thermique du bâtiment. Il conçoit, dimensionne et optimise les installations de chauffage, de production d'énergie et de climatisation.

CLIMATIQUE : relatif au climat. **Le climaticien** est un ingénieur ou entrepreneur spécialisé dans les systèmes de climatisation ou de conditionnement d'air, avec une approche centrée sur le confort thermique et la qualité de l'air intérieur.

Un K (ou maintenant U), une longue histoire...

Les thermiciens ont toujours eu une passion pour les coefficients. Depuis 1974, chaque nouvelle réglementation thermique en a ajoutée de nouveaux, étoffant un langage devenu incontournable dans la profession. Parmi eux, le célèbre **coefficient « K »**, rebaptisé depuis « U » sous l'effet des normalisations européennes – concessions aux usages anglo-saxons. Alors, avec le Brexit, retrouverons-nous un jour notre cher K1 ? La question reste ouverte.

Derrière ce simple symbole se cache en réalité une **histoire scientifique longue de plus de deux siècles**.

L'équation qui permet de calculer les **dépensements thermiques par conduction** à travers une paroi séparant deux ambiances à températures différentes est attribuée à **Eugène Péclet** (1793-1857). Il prolongeait alors les recherches d'**Isaac Newton** (1643-1727), pionnier de la convection, et de **Jean-Baptiste Fourier** (1768-1830), théoricien de la conduction.

C'est **Franz Grashof** (1826-1893) qui introduit pour la première fois le **coefficient K**,

bien que les valeurs des échanges thermiques de surface ne soient pas encore établies à l'époque. Quelques décennies plus tard, **Hermann Rietschel** (1847-1914) propose des estimations plus précises – proches de celles encore utilisées aujourd'hui. Enfin, les contributions de **Ludwig Boltzmann** et de **Max Planck** (1858-1947) permettront de formuler les **lois du rayonnement thermique**, donnant ainsi naissance à un **coefficient U complet et cohérent**, tel qu'on le connaît aujourd'hui.

Ce coefficient n'est donc pas qu'un simple paramètre dans une équation. Il incarne l'héritage de **grands scientifiques** dont les noms, bien souvent, ornent nos rues, nos écoles ou nos manuels de physique. C'est ce constat qui m'a inspiré la création de ce document : un **aide-mémoire technico-historique** retraçant les lois, formules et principes qui portent le nom de leurs auteurs.

L'objectif ? Offrir un **outil pédagogique et pratique**, tout en rendant hommage à ces **hommes et femmes de science**, thermiciens² et savants, qui, par leurs découvertes, nous ont transmis les fondations du **génie climatique moderne**.

1. Pourquoi les lettres « K » et « U » pour désigner ces fameux coefficients ?

La lettre K, utilisée historiquement pour désigner le coefficient de transmission thermique, pourrait trouver son origine dans le mot « kilocalorie », ou plus précisément dans le « Kalorie » allemand – une hypothèse plausible compte tenu de l'influence germanophone dans les sciences physiques. Autre explication possible : le K, peu utilisé en français, se prêtait bien à désigner un concept technique sans ambiguïté.

Aujourd'hui, ce coefficient est remplacé par la lettre U, selon la terminologie anglo-saxonne. Le « U-value » fait référence à la quantité de chaleur qui traverse un matériau par unité de surface et par unité de temps. L'origine de ce choix pourrait venir des mots « unit » ou « overall », soulignant le caractère global de ce coefficient dans l'analyse thermique des parois.

2. Le rôle du thermicien : bien plus qu'un technicien

Traditionnellement, le **thermicien** désigne le spécialiste des installations de **chauffage, ventilation et climatisation (CVC)**. Il conçoit les systèmes, supervise leur installation et veille à leur bon fonctionnement dans la durée, en assurant **maintenance et optimisation énergétique**. Véritable expert de la **thermique du bâtiment**, son rôle s'inscrit aujourd'hui au cœur des enjeux de performance énergétique et de transition environnementale.

EN AVANT-PROPOS

Rappel de quelques définitions

Le nom d'un savant est souvent associé à une **loi**, un **principe** ou un **théorème**. Pour faciliter la lecture de ce mémento, il nous paraît utile de rappeler brièvement la signification de certains termes techniques que vous retrouverez tout au long des pages suivantes. Ce rappel vise à **poser les bases** et à **mieux comprendre** les notions liées aux contributions des physiciens cités.

Axiome	Vérité admise sans démonstration et sur laquelle se fonde une science, un raisonnement ; principe posé hypothétiquement à la base d'une théorie déductive. Synonyme postulat.
Climat artificiel Génie climatique Climatique Climaticien	Génie climatique. Pour étudier le confort dans des ambiances où sont à la fois contrôlés température et humidité, André Missenard introduisit la notion de « climats artificiels ». Puis Roger Cadiergues est à l'origine du terme « génie climatique ». Maintenant le « génie climatique » désigne l'ensemble des techniques de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (ou de climatisation) - CVC, traitant du confort thermique (pour les occupants) et de la performance énergétique (des bâtiments). Ainsi le génie climatique rassemble les techniques assurant le confort thermique avec la maîtrise de la performance énergétique des équipements. Le (la) « climaticien(ne) » est le ou la spécialiste du traitement de l'air. Il ou elle est aussi et encore appelé le ou la « thermicien(ne) » ou « chauffagiste ».
Climatisation Conditionnement d'air	Climatisation ou conditionnement d'air ? Il y a 2 acceptations : <ul style="list-style-type: none"> • La climatisation désigne les techniques pour le confort des occupants alors que le conditionnement d'air s'intéresse au contrôle des ambiances industrielles, • En climatisation seule la température est contrôlée tandis qu'en conditionnement d'air température et humidité de l'air sont contrôlés.
Coefficient	Nombre caractérisant une propriété déterminée d'un corps. Exemple : le coefficient de conductivité thermique $\lambda' = 0.025 \text{ [W.m}^{-1}.K^{-1}]$ à 20 [°C]
Constante	Caractéristique physique permettant d'identifier un corps Exemple : La constante des gaz parfaits ; $R = 8,314... \text{ [J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}]$
Contraposée	Raisonnement logique dans lequel on affirme une implication pour ensuite nier la conséquence. Exemple : si une cause implique une conséquence, alors s'il n'y a pas de cause il n'y a pas de conséquence.
Cycle	Ensemble des caractéristiques physiques prises par un phénomène périodique au cours d'une période. Exemple : cycle de Carnot, de Rankine, de Diesel...
Diagramme	Représentation graphique des variations d'un phénomène ou d'une grandeur. Exemples : diagramme de Mollier, diagramme de Carrier, diagramme de l'air humide (AICVF)...
Echelle	Ensemble de graduations de valeurs, comme les échelles de températures. Exemple : Celsius, Réaumur, Fahrenheit...
Effet	Résultat observable d'une action physique. Exemple : l'effet joule, échauffement d'un conducteur parcouru par un courant électrique $W[J] = R \cdot I^2 \cdot t$ avec $R[\Omega]$; $I[A]$ et $t[sec]$
Equation	Égalité contenant des inconnues. Exemple : équation des gaz parfaits ; $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ avec $p[Pa]$; $V[m^3]$; n [nombre de mole] ; $R = 8,314... \text{ [J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}]$ et T [température en kelvins]

Flacon	Dispositif expérimental. Exemple : flacon de Mariotte...
Fonction	Grandeur dépendant d'une ou plusieurs variables. Exemple : l'entropie est une fonction d'état. Voir Clausius et fonctions d'état dans « Notations » qui suivent.
Formule	Expression d'une loi physique. Exemple : formule de Duperray qui donne la pression de la vapeur saturante de l'eau p [bars] en fonction de la température t [°C] : $p = (t/100)^4$
Hypothèse	Ensemble des données à partir duquel on démontre par un raisonnement logique une proposition. Exemple : voir les hypothèses qui sont posées pour l'établissement de la formule de Dupré.
Loi	Énoncé décrivant un phénomène vérifié expérimentalement. Ex. : loi de Dalton. Exemple : loi de Dalton.
Nombre	Rapport entre une quantité et une autre quantité prise comme terme de comparaison et qu'on appelle unité. Exemple : nombre d'Avogadro. $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ nombre de molécules contenues dans une molécule-gramme, de Nusselt, de Reynolds, de Prandtl...
Postulat	Principe indémontrable (ou non démontré) dont l'admission est nécessaire pour établir une démonstration. Exemple : le postulat de Clausius. Une quantité de chaleur ne passe pas d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud.
Principe	Loi à caractère général régissant un ensemble de phénomène qui est vérifié par l'exactitude de ses conséquences. Exemple : le principe de Carnot. Au cours d'une transformation monotherme, un système ne peut que recevoir du travail et céder de la chaleur.
Rapport	Un rapport est le quotient de deux valeurs qui se rapportent à des grandeurs de la même espèce. Quand le quotient se rapporte à des grandeurs d'espèces différentes, on parle de taux. Un rapport est une grandeur sans dimension : il ne conserve aucune trace des grandeurs qu'il compare.
Relation	Condition qui lie les valeurs de deux (ou plus) grandeurs. Exemple : Relations de Clapeyron. Comme : $dQ = C_v dT + L dv$ (Voir à Clapeyron).
Série	En mathématiques, la notion de série permet de généraliser la notion de somme finie. Le calcul d'une somme finie ne pouvant pas toujours être simplifié, un certain nombre de méthodes permettent de déterminer la nature (convergence ou non) d'une série sans réaliser explicitement les calculs. Exemple : Série de Fourier.
Théorème	Énoncé d'une proposition ou d'une propriété que l'on démontre par un raisonnement logique à partir de faits donnés ou d'hypothèses justifiables inclus dans l'énoncé. Exemple : théorème de Bernoulli en mécanique des fluides. La somme des pressions et des énergies mécaniques par unité de volume est constante tout le long du tube de courant.
Thermique Thermicien(ne)	Branche de la physique qui étudie la production de la chaleur ou de froid et leurs transferts. Le ou la thermicien(ne) est celui ou celle qui conçoit, réalise, maintient des installations de génie climatique.
Thermodynamique	La thermodynamique traite des échanges faisant intervenir chaleur et travail dans les systèmes physiques.

Notations

Dans ce qui suit nous retiendrons les notations suivantes :

Travail et chaleur		
Q [J]	Quantité de chaleur	Q>0 : quantité de chaleur reçue par le système. Q<0 : quantité de chaleur perdue par le système. Si dQ = 0 ; la transformation est dite adiabatique (voir Mayer).
W [J]	Energie mécanique (Travail)	W>0 : énergie mécanique gagnée par le système. W<0 : énergie mécanique perdue par le système.
J	Symbole du joule, unité de travail, d'énergie, de quantité de chaleur. Équivalent mécanique de la « calorie » - W = J·Q ; 1 kcal = 4185.5 J	
Variables d'état (Elles définissent l'état d'un gaz). Voir Clapeyron		
P [Pa]	Pression	Dans une transformation si dP = 0 ; la transformation est dite isobarique.
V [m³]	Volume	Dans une transformation si dV = 0 ; la transformation est dite isochorique.
T [K]	Température	Dans une transformation si dT = 0 ; la transformation est dite isotherme.
Fonctions d'état (En thermodynamique, une fonction d'état correspond à un état du système)		
U [J]	Energie interne	L'énergie interne peut être rapportée à l'unité de masse [J·kg ⁻¹] ou à la mole [J·mol ⁻¹]. (Voir Mayer - 1 ^{er} principe de la thermodynamique et 1 ^{ère} loi de Joule).
H [J]	Enthalpie (Appelée autrefois chaleur totale)	L'enthalpie peut être rapportée à l'unité de masse [J·kg ⁻¹] ou à la mole [J·mol ⁻¹]. (Voir Mayer - 1 ^{er} principe de la thermodynamique et 2 ^{ème} loi de Joule). Dans une transformation si dH = 0 ; la transformation est dite isenthalpique.
S [J·K⁻¹]	Entropie	L'entropie peut être rapportée à l'unité de masse [J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹] ou à la mole [J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹] (Voir Clausius).
F [J]	Energie libre	F = U - T·S
G [J]	Enthalpie libre	G = H - T·S

De la RT à la RE

Les coefficients¹ du climaticien

RT « La réglementation thermique¹ » voit le jour en France avec l'**arrêté du 10 avril 1974**, qui fixe les premières exigences en matière d'**isolation thermique** et de **régulation automatique des installations** dans les bâtiments d'habitation. Ce texte fondateur marque un tournant : pour la première fois, des **coefficients de performance** doivent être respectés par le maître d'ouvrage lors du dépôt d'un permis de construire.

Ces coefficients, issus de la **thermique du bâtiment**, ne sont pas totalement nouveaux. Certains étaient déjà utilisés dès les années 1970 par **EDF**, dans le cadre de la promotion du **chauffage électrique**. Cette approche combinait **isolation renforcée**, **contrôle de la ventilation** et **régulation automatique du chauffage**, posant ainsi les bases de ce qui deviendra quelques années plus tard une exigence réglementaire à l'échelle nationale.

Historique de la réglementation thermique en coefficients

1974 Économies d'énergie	G [W/m ² .°C]	Limiter les déperditions thermiques du logement.
1982 Valoriser les apports solaires	B [W/m ² .°C]	Limiter les besoins de chauffage du logement.
1988 Maîtrise de l'énergie	C [uee/an]	Réduire les émissions de gaz à effet de serre en limitant ses consommations d'énergie pour le chauffage et l'ECS du logement.
2000 Développement durable	Cep [kWhep/an] Tic	Limiter, par rapport à une référence, les consommations d'énergie pour le chauffage, la ventilation, l'ECS, les auxiliaires et l'éclairage de toutes les constructions neuves en préservant le confort d'été.
2005 Plan Climat	UBât [W/m ² .K] Cep [kWhep/m ² .an] Tic	Limiter, par rapport à une référence, les consommations d'énergie pour le chauffage, la ventilation, l'ECS, les auxiliaires, le refroidissement et l'éclairage de toutes les constructions neuves en préservant le confort d'été.
2010 / 2012 Grenelle de l'Environnement	Bbio [En nombre de points] Cep [kWhep/m ² .an] Tic	Inciter à concevoir des bâtiments ayant des enveloppes performantes. Limiter, en valeur absolue les consommations d'énergie pour le chauffage, la ventilation, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires, le refroidissement et l'éclairage de toutes les constructions neuves en préservant le confort d'été.

Depuis l'an 2000, la réglementation thermique (RT) française est révisée tous les cinq ans, afin de suivre les évolutions technologiques et les enjeux énergétiques croissants du secteur du bâtiment.

Cette dynamique a conduit, en 2020, à la naissance d'une nouvelle génération de normes : la **réglementation environnementale (RE)**. Elle ne se limite plus à la seule performance énergétique, mais intègre également **l'empreinte carbone** des bâtiments. Inspirée du label expérimental **E+/C-** (Énergie positive / Carbone négatif), la **RE 2020** vise à encourager les constructions consommant **moins d'énergie** et émettant **moins de gaz à effet de serre**.

Elle est officiellement **entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2022**, marquant une transition vers une approche globale et durable de la conception des bâtiments.

1. Depuis 2000, il a été convenu que notre réglementation thermique devait être révisée tous les 5 ans

Réglementation du bâtiment. RE 2020, Climat et résilience

Depuis près de cinquante ans, le secteur du bâtiment est encadré par une réglementation visant à **maîtriser les consommations d'énergie**. À la suite de plusieurs **réglementations thermiques (RT)**, la **RE 2020** est entrée en vigueur le **1^{er} janvier 2022**. Elle introduit une nouvelle dimension : la **prise en compte de l'empreinte carbone** des bâtiments.

La première réglementation thermique remonte à **1974**, avec un décret et un arrêté imposant des exigences d'**isolation thermique** et de **régulation des installations**. Le cadre réglementaire reposait alors sur un **coefficient G** ($W/m^3 \cdot ^\circ C$), calculable à partir de méthodes simples utilisées par les professionnels. Ces règles permettaient également d'estimer les **consommations annuelles d'énergie**.

Au fil du temps, les RT ont évolué, intégrant de **nouveaux indicateurs** et des **méthodes de calcul plus complexes**. La **RT 2012**, encore en vigueur pour certains permis de construire, repose sur un moteur de calcul conforme aux **règles Th-BCE 2012**, publiées mais principalement exploitées via des **logiciels spécialisés**.

La **RE 2020** prolonge cette évolution en intégrant l'évaluation de l'**empreinte carbone** des **matériaux, équipements et consommations énergétiques**. Les résultats sont exprimés en **kg équivalent CO₂ par m² et par an** [kg eq. CO₂/(m²·an)]. Les consommations restent exprimées en **énergie primaire conventionnelle**. Deux indicateurs spécifiques ont été introduits : **Ic construction** et **Ic énergies**.

Et pour les bâtiments existants ?

La réglementation thermique ne s'applique pas qu'aux constructions neuves. Depuis 2007, une **RT dite « Existant »** encadre les travaux de rénovation énergétique des bâtiments. Elle impose des **exigences de performance** lors de rénovations importantes ou par élément (remplacement d'une chaudière, d'une fenêtre, etc.), afin d'assurer une **amélioration progressive du parc bâti**.

En complément, le **Diagnostic de Performance Énergétique (DPE)** est devenu un outil central de la politique de rénovation. Revu en profondeur en **2021**, il fournit une **étiquette énergie-climat** lisible et opposable juridiquement. Il sert de **référence réglementaire** pour la vente, la location et l'identification des «

« **passoires thermiques** », qui font l'objet de mesures spécifiques dans le cadre de la loi Climat et Résilience.

Une réglementation en transition

Parallèlement à la RE 2020, la **loi Climat et Résilience**, promulguée en **2021**, fixe un objectif de réduction de **40 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030**, par rapport à 1990. Ce texte comprend **305 articles**, dont **12 concernent directement le secteur du bâtiment**, notamment dans le **titre V - Se loger**, axé sur la **rénovation énergétique des logements les plus consommateurs**.

En **1988**, lors de la mise en œuvre de la **RT88**, des **solutions-types** pour les maisons in-

dividuelles avaient été publiées et faisaient autorité. À ce jour, aucun équivalent n'a été intégré à la RE 2020.

Un **arrêté** encadre la méthode de calcul des **performances énergétique et environnementale** des constructions neuves de **logements, de bureaux et de bâtiments d'enseignement primaire ou secondaire en France métropolitaine**. Cette méthode repose sur **trois annexes techniques**, notamment les règles **Th-BCE 2020** et **Th-Bât 2020**.

Réglementation Environnementale

Indicateur	Unité	Objectif
Bbio (Besoin bioclimatique)	kWh _{ep} /(m ² ·an)	1. Limitation des besoins en énergie du bâtiment (chauffage, refroidissement, éclairage).
Cep (Consommation d'énergie primaire)	kWh _{ep} /(m ² ·an)	2. Limitation des consommations d'énergie.
Cep max (Seuil réglementaire)	kWh _{ep} /(m ² ·an)	Seuil maximal autorisé de consommation d'énergie primaire.
IC énergie (ou Ic énergies)	« points » (kgCO _{2e} /m ² ·an)	3. Évaluation de l'impact carbone des consommations d'énergie (exploitation du bâtiment).
IC construction (ou Ic construction)	« points » (kgCO _{2e} /m ²)	4. Évaluation de l'impact carbone des composants (matériaux, équipements).
DH (Degrés-heures)	(°C·h)/an)	5. Limitation des situations d'inconfort estival (température intérieure excessive).

LES THERMICIENS ET LEURS ATTRIBUTS

Les thermiciens et physiciens cités (liste non exhaustive)

Les auteurs	Célèbres pour en particulier...
Ampère	L'unité d'intensité du courant électrique, le bonhomme et la règle d'Ampère.
Archimède	Principe d'Archimède, l'axiome, la vis. La valeur de π .
Avogadro	La loi et de nombre d'Avogadro.
Bacharach	Indice, analyseur de Bacharach.
Beau De Rochas	Le cycle de Beau de Rochas du moteur à 4 temps.
Bell A. Graham	Le téléphone et le décibel [dB] mesure de l'intensité des sons.
Bernoulli	La formule, schéma, théorème de Bernoulli.
Bertrand	La formule de Bertrand dite aussi de Dupré ou de Rankine - Kirchhoff.
Biot	Le nombre de Biot, équation de la chaleur.
Boltzmann	La constante et la loi de Boltzmann.
Borda	La formule de Borda - Carnot. La méthode Borda.
Bouvard et Ratinet	Les tables de logarithmes [désignés par « ln » auparavant « log »].
Boyle	La loi de Boyle - Mariotte (Gaz parfaits).
Cadiergues	Le père du génie climatique. La vitesse silencieuse (Formule de Croquelois).
Carnot	Le principe, le théorème, le rendement de Carnot...
Carrier	Le diagramme de Carrier.
Casari	Le diagramme de l'air humide de Casari - Véron (dit de l'AICVF).
Casati et Cristin	Le thermomètre de Lyon.
Celsius	L'échelle thermométrique centésimale et le degré Celsius [°C].
Charles	La loi des gaz parfaits de Charles ($P = C^{\circ}$).
Clapeyron	Les relations et la formule de Clapeyron.
Clausius	Le postulat et le théorème de Clausius.
Dalton	La loi des mélanges de Dalton :
Darcy	La loi de Darcy, équation de Darcy-Weisbach.
Diesel	Cycle Diesel.
Dewar	Vase calorimétrique Dewar, bombe calorimétrique.
Dulong et Petit	La loi de Dulong et Petit.
Dupre	La formule de Dupré dite de Bertrand ou de Rankine - Kirchhoff, dite aussi formule de Duperray.

Einsten	La relativité $E = m \cdot c^2$
Fahrenheit	L'échelle et le degré Fahrenheit [°F].
Fanger	L'indice de confort thermique PMV. L'olf et le décipol (QAI).
Fourrier	La loi et les développements en série de Fourrier.
Galilee	Lunette astronomique, loi de la chute des corps, échappement à pendule, thermomètre à boules ...
Gay-Lussac	La loi des gaz parfaits de Gay-Lussac ($V = C^t$).
Glaser	La loi et le diagramme de Glaser.
Gramme	La dynamo (Machine dynamoélectrique).
Grashof	Le nombre de Grashof.
Jancovici	Bilan carbone - Emissions de CO_2
Joule	L'effet, les lois et l'unité de travail de Joule.
Karman	Allée-double des tourbillons alternés.
Kelvin	La fonction et l'unité de température de Kelvin. Voir : Thomson.
Kirchoff	Les lois sur le rayonnement et sur les courants dérivés.
Lavoisier	Rien ne perd, rien se créé, tout se transforme.
Mariotte	Les lois sur les gaz parfaits.
Mayer	Le principe et la relation.
Mc Adams	La formule de Mc Adams pour les transferts thermiques.
Missenard	Le thermomètre boule et les climats artificiels d'André Missenard.
Mollier	Le diagramme enthalpie de Mollier.
Montgolfier	La formule des frères Montgolfier pour les cheminées, le bélier hydraulique.
Morizet	Loi « interdiction de fumer ».
Newton	Principe, unité de force, gravitation, développements... de Newton.
Nusselt	Le nombre de Nusselt.
Neper	Les logarithmes népériens [ln] anciennement [log].
Ohm	L'unité de résistance électrique et la loi d'Ohm.
Oswald	Tube d'Oswald (Contrôle combustion).
Oughthed	La règle à calculer.
Pascal	Unité de pression, la loi, les découvertes en mathématique.
Peltier	L'effet Peltier (Transducteur).
Petit	Voir Dulong et Petit - Les lois de Dulong et Petit.
Pitot	Le tube de Pitot.
Planck	Le nombre, la constante et la loi de Planck.
Plante	Accumulateur au plomb (dit batterie électrique).
Prandtl	L'antenne de Prandtl (ou tube), le nombre de Prandtl.
Pythagore	Théorème de Pythagore, le Pont aux ânes.

Rankine	L'échelle de température, le cycle de Rankine.
Reaumur	L'échelle de température de Réaumur.
Regnault	La formule et la loi de Regnault.
Recknagel	Le manuel du Génie Climatique.
Reynolds	Le nombre de Reynolds (convection).
Rietschel	Le Père du Chauffage et de la ventilation.
Ringelmann	Charte, échelle de Ringelmann.
Sabine Wallace Clément	Le coefficient « α Sabine » et le formule de Sabine.
Seebeck	L'effet, coefficient Seebeck.
Stephan	La loi du rayonnement de Stéphan.
Stirling	Le moteur Stirling.
Thales	Le théorème de Thalès.
Thomson	Voir Kelvin.
Torricelli	Le théorème de Torricelli, tube barométrique.
Venturi	L'effet, le tube Venturi.
Veron	Le cours de thermique industrielle du Professeur Marcel Veron.
Voillot	Un président de l'AICVF à qui l'association lui doit beaucoup.
Volta	Inventeur de la première pile électrique dite voltaïque.
Watt	Unité de puissance, régulateur, principe de Watt.

Avertissement

Cet aide-mémoire fait majoritairement référence à des figures masculines du génie climatique. Il reflète une réalité historique : pendant longtemps, les métiers liés aux installations de **chauffage, ventilation et climatisation (CVC)** relevaient quasi exclusivement de l'ingénierie, un domaine longtemps réservé aux hommes. À titre d'exemple, ce n'est qu'en **1964** que **Nicole Laroche** devient la première femme admise à l'École des Arts et Métiers, jusqu'alors exclusivement masculine.

Cependant, à toutes les époques, des **femmes ont activement contribué au progrès scientifique**. À ce sujet, **Solène Duprat**, présidente du Comité technique de l'AICVF, apporte un éclairage important (voir chapitre « Les femmes et 3 000 ans d'histoire » en fin d'ouvrage).

Remerciements

Ce **mémento de climatique**, original dans sa conception, a vu le jour grâce à l'initiative de **Frédéric Massip**, président du comité de rédaction de la revue *CVC*. Il en a assuré la coordination, la mise au point et la présentation.

Sa réalisation a bénéficié de la **relecture attentive du Comité technique de l'AICVF**, sous la présidence de **Solène Duprat**, ainsi que des contributions de **Christian Cardonnel**, **Michel Laval**, **Ghislain Pinçon**, **Jean Pradère** et de la validation de **Francis Allard**, Membre et Conseiller scientifique de l'AICVF, président du Comité Enseignement, président du comité international et professeur retraité à La Rochelle Université. Qu'ils soient tous ici chaleureusement remerciés pour leur implication.

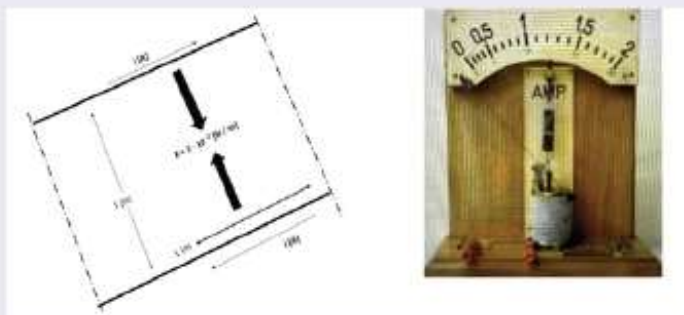
Les thermiciens et leurs attributs

André Marie AMPERE

(1775-1836)

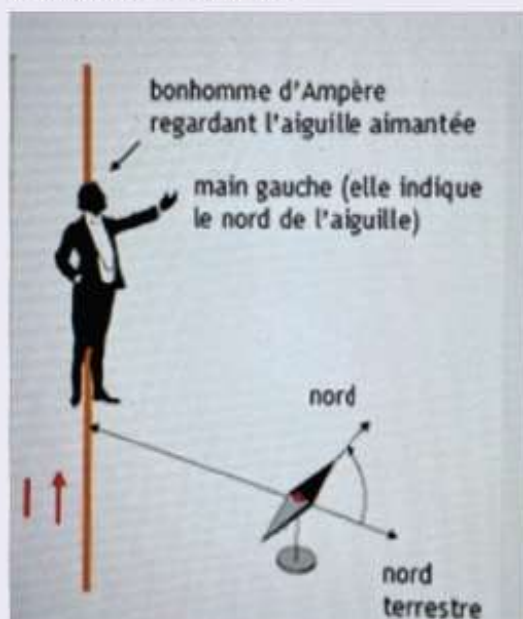
Mathématicien, physicien et philosophe français, né à Lyon et mort à Marseille. On lui doit, en particulier : L'unité d'intensité de courant électrique l'ampère, la règle d'Ampère, le bonhomme d'Ampère, le galvanomètre, l'électro dynamisme, le télégraphe électrique (en collaboration avec Arago) ...

L'Ampère. Unité d'intensité de courant électrique, l'ampère est une des 7 unités de base du système international SI. Le décret du 3 mai 1961 modifié le décembre 1975 a rendu obligatoire en France le système métrique décimal à 7 unités de base appelé, par la Conférence générale des poids et mesures, système international d'unités (SI).



L'ampère [A] est l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs, parallèles, rectilignes, de longueurs infinies, de sections circulaires négligeables et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force de : $2 \cdot 10^{-7}$ [N/m] newton par mètre de longueur. (Ancienne définition voir annexe unités du système SI)

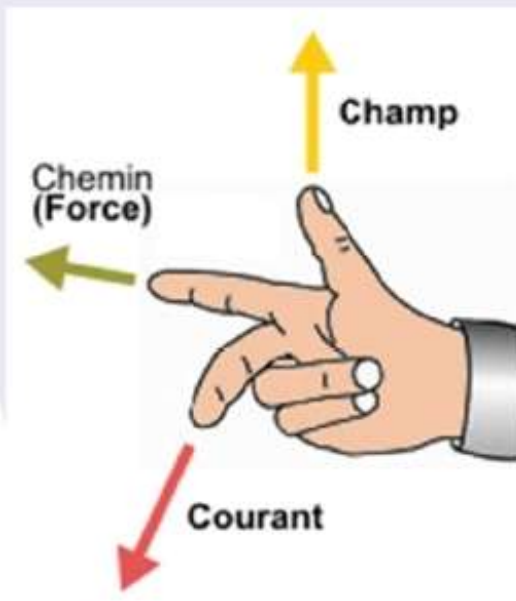
Bonhomme d'Ampère



En 1820 Oersted remarque que le passage d'un courant électrique dans un fil fait dévier l'aiguille aimantée d'une boussole. Oersted se contente de décrire le phénomène dans une publication, dont Arago a connaissance. A Paris, Arago reproduit l'expérience d'Oersted devant l'Académie des Sciences, dont font partis André Marie Ampère et Laplace.

Ampère constate que l'aiguille aimantée est déviée. Si elle est déviée c'est que le passage du courant électrique vient créer autour de lui un champ magnétique plus intense que le champ terrestre et dont la direction est donnée par la nouvelle orientation de l'aiguille aimantée. Pour définir cette nouvelle orientation, Ampère imagine le Bonhomme d'Ampère. Lorsque le bonhomme est traversé des pieds à la tête par le courant électrique I [A] il voit l'aiguille aimantée déviée vers sa gauche : C'est la **Règle d'Ampère**. Avec un barreau suspendu à un fil de torsion, Ampère mesure l'intensité du champ magnétique produit par le courant. Il trouve que l'intensité du champ magnétique A [mT] est proportionnel à I [A] et inversement proportionnel à la distance r [m].

Règle des 3 doigts de la main droite



En physique, la règle de la main droite concerne le champ magnétique. Lorsqu'un conducteur sous tension est exposé à un champ magnétique, par exemple par un aimant en fer à cheval, une force est exercée sur ce porteur de charge. Le rappel illustre les directions dans lesquelles les forces agissent sur le conducteur:

Le pouce enregistre la direction du mouvement des particules chargées positivement (électrons) dans la direction actuelle de + à -. Ce sens de déplacement est appelé tension (ampère).

L'index décrit la direction des lignes de champ du champ magnétique du pôle nord au sud. La règle de la main droite permet également de déterminer la polarité des lignes de champ magnétique, c'est-à-dire leur direction. La densité de flux magnétique décrit la force de ce champ.

Dans cette constellation, le majeur indique la force qui influence le porteur de courant.

Galvanomètre. L'appareil doit son nom à Luigi Galvani et le premier galvanomètre fut construit par Johann Schweigger à l'Université de Halle en 1820. Ampère contribua ensuite à son développement.

Télégraphe électrique. Plusieurs encyclopédies, sur papier ou en ligne, affirment qu'Ampère a inventé le galvanomètre, le premier télégraphe électrique, l'électroaimant avec Arago, voire même le moteur électrique. On admet que la contribution d'Ampère à l'histoire de la télégraphie électrique se résume à la phrase suivante publiée dans son mémoire de 1820 : «On pourrait, au moyen d'autant de fils conducteurs et d'aiguilles

aimantées qu'il y a de lettres, et en plaçant chaque lettre sur une aiguille différente, établir, à l'aide d'une pile placée loin de ces aiguilles, et qu'on ferait communiquer alternativement par ses deux extrémités à celles de chaque conducteur, former une sorte de télégraphe propre à écrire tous les détails qu'on voudrait transmettre à travers quelque obstacle que ce fût. En établissant sur la pile un clavier dont les touches porteraient les mêmes lettres et établiraient la communication par leur abaissement, ce moyen de correspondance pourrait avoir lieu avec assez de facilité et n'exigerait que le temps nécessaire pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre.»

ARCHIMEDE de Syracuse

287 - 212 av. JC

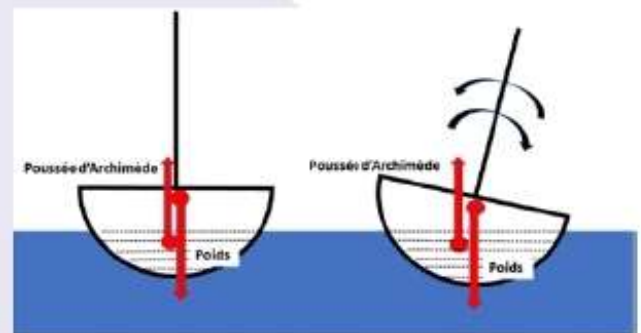
On lui doit : son principe de vis sans fin, son axiome, une valeur de π ,... entre autres. Né à Syracuse et mort en cette même ville, Archimède est un grand scientifique physicien, mathématicien et ingénieur

Le **Principe d'Archimède** (ou poussée). Il y a de nombreuses formes équivalentes pour énoncer le célèbre. Par exemple :

Tout corps plongé dans un liquide subit une poussée verticale dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé et appliqué au centre de gravité du liquide déplacé.

(*Énoncé de collégiens : tout corps plongé dans la poche d'un copain et qui ne reparait pas au bout d'un quart d'heure peut être considéré comme perdu.*)

D'une façon plus générale : les pressions exercées par un fluide sur un corps qui est immergé sont équivalentes à une force unique dirigée vers le haut égale au poids du volume déplacé et passant par le centre de gravité de ce volume



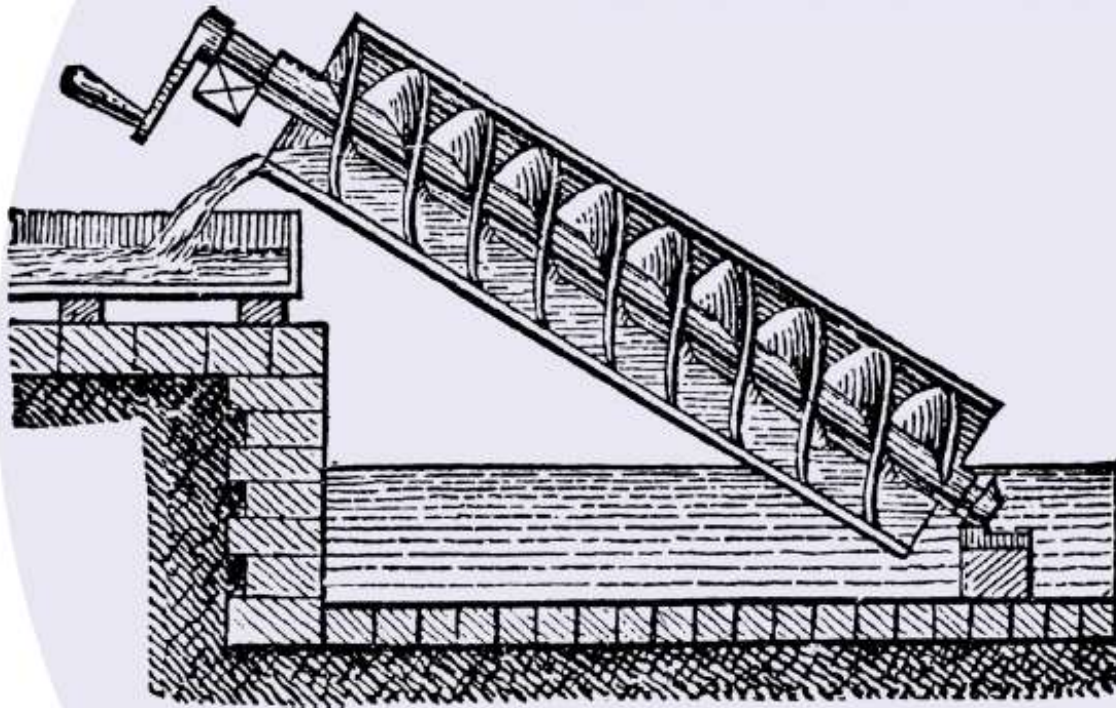
Axiome ou postulat d'Archimède. Il s'énonce souvent ainsi :

« Parmi les lignes inégales, les surfaces inégales, les corps solides inégaux, le plus grand dépasse le plus petit d'une grandeur telle que, ajoutée à elle-même peut dépasser toute grandeur donnée ayant un rapport avec les grandeurs comparées entre elles ».

C'est sur cet axiome que sera fondée réellement la notion de continuité en géométrie et est la pierre fondatrice de la méthode d'exhaustion d'Eudoxe qu'Archimède améliorera pour jeter les bases du calcul différentiel, tout cela 2 000 ans avant Leibnitz (Eudoxe de Cnide 400-355 avant J.C.).

Nota : La méthode d'exhaustion peut s'énoncer ainsi : en soustrayant de la plus grande de deux grandeurs données plus de sa moitié, et du reste plus de sa moitié, et ainsi de suite, on obtiendra une grandeur moindre que la plus petite. En mathématiques cette méthode permet de calculer des aires de figures complexes et de réaliser la quadrature du cercle !

Vis d'Archimède. Parfois aussi nommée « escargot » ou encore « vis sans fin » aurait été mise au point par Archimède lors d'un voyage en Égypte permettant ainsi aux habitants des bords du Nil d'irriguer leurs cultures. Autres inventions : la poulie, le levier - « Donnez-moi un point d'appui et je soulèverai le monde ! ».



Calcul de la valeur de Pi $[\pi]$. Vers 250 ans avant J-C, Archimède suivi une méthode ingénieuse pour calculer la longueur de la circonférence. Il encadre la valeur de $(\pi \cdot D)$ entre le périmètre du polygone régulier inscrit dans le cercle et le périmètre du polygone régulier exinscrit. Si on considère les hexagones inscrit et exinscrit dans le cercle figuré à droite, la longueur de la circonférence est comprise entre le périmètre de l'hexagone bleu et celui de l'hexagone vert. Près de 2000 ans avant Newton et Leibniz et avec des polygones à 96 côtés, Archimède est arrivé à une très bonne approximation¹ :

$220/71 < \pi < 22/7$.

Mais la plus ancienne valeur de π dont l'utilisation est attestée provient d'une tablette babylonienne en écriture cunéiforme découverte en 1936 et datée de 2 000 ans avant J.C. La valeur de π aurait été trouvée en comparant le périmètre du cercle avec celui de l'hexagone inscrit, égal à 3 fois le diamètre ; ils en déduisirent cette valeur approximative : $\pi = 3 + 1/8$ soit : 3,125

Vers 1450, Al Kashi calcule π avec une précision de 14 décimales par la méthode des polygones d'Archimède. Il faut attendre la naissance du calcul infinitésimal² dans la

seconde moitié du XVII^{ème} siècle pour que Gottfried Wilhelm Leibniz fasse intervenir le nombre π dans l'étude des séries. Il calcula les 314 premières décimales de π à partir de la suite :

$$\pi/4 = 1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - 1/11 + \dots$$

En 1874, Williams Shanks les 707 décimales de π que le Palais de la Découverte recopie en 1967 sur le plafond de la rotonde. En 1947, le mathématicien anglais Ferguson découvre une erreur à partir de la 528^{ème} décimale. Le musée a immédiatement corrigé cette erreur et contrairement aux rumeurs, il n'y a plus d'erreur dans les décimales affichées.

1. Voir en annexe quelques nombres

2. Le calcul infinitésimal est fondé sur l'étude des infinis petits et des ses limites et comprend le calcul différentiel (variations locales de différentes quantités) et le calcul intégral (valeur moyenne d'une fonction dans un intervalle).



Palais de la Découverte : valeur de π

Un **moyen mnémotechnique** classique pour retrouver les premières décimales de Pi (π). Il repose sur un principe simple : **le nombre de lettres de chaque mot donne une décimale.** Voici les premières lignes du poème :
Que j'aime à faire connaître ce nombre utile
aux sages, glorieux Archimède, artiste ingénieux,
toi de qui Syracuse aime encore la gloire,
soit ton nom conservé par de savants grimoires ...

Amadeo AVOGADRO

(1776 - 1856)

Lorenzo Romano Amadeo Carlo Avogadro
Comte de Quaregna de Cerreto

Physicien et chimiste italien né à Turin. Il est l'auteur d'une théorie des atomes. On lui doit une loi sur les gaz et la valeur du nombre des atomes d'une molécule-gramme.

Loi d'Avogadro. Des volumes égaux de tous les gaz, pris dans les mêmes conditions de température et de pression renferment des nombres égaux de molécules. Les masses volumiques sont donc proportionnelles aux masses moléculaires.

Nombre d'Avogadro. C'est le nombre de molécules réelles contenues dans une molécule-gramme :

$N = 6.02 \times 10^{23}$ (Milkan et Backlin 1936)

Rappelons que :

La molécule-gramme d'un corps simple ou composé est le poids de ce corps qui, à l'état

gazeux occupe le même volume que 32 g d'oxygène pris dans les mêmes conditions de pression et de température.

Que le volume molaire est le volume occupé par la molécule-gramme dans les conditions normales (1.013 x 10⁵ Pa et 0 °C). Ce volume est égal à 22.4 L.

BACHARACH

Firme de Pittsburgh (USA)
Indice et analyseur

Indice de Bacharach ou Indice fumée. Cet indice permet de qualifier le noircissement des fumées c'est-à-dire de la qualité du fonctionnement d'un bruleur. Il va de 1 à 10, plus il est élevé plus la teneur en suies est élevée.

Analyseur de gaz Bacharach. Les analyseurs de gaz (O₂, CO, CO₂... en particulier) sont utilisés pour régler les combustions (détermination de l'excès d'air et rendement) et pour contrôler des émissions diverses.

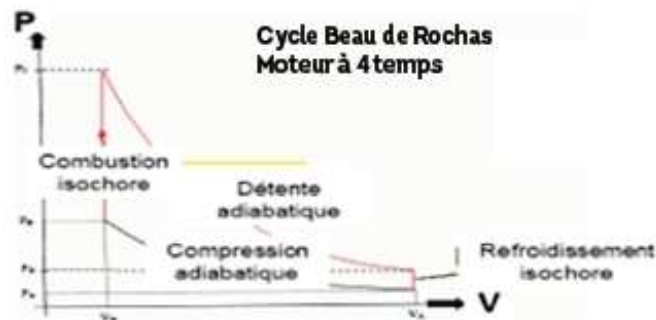
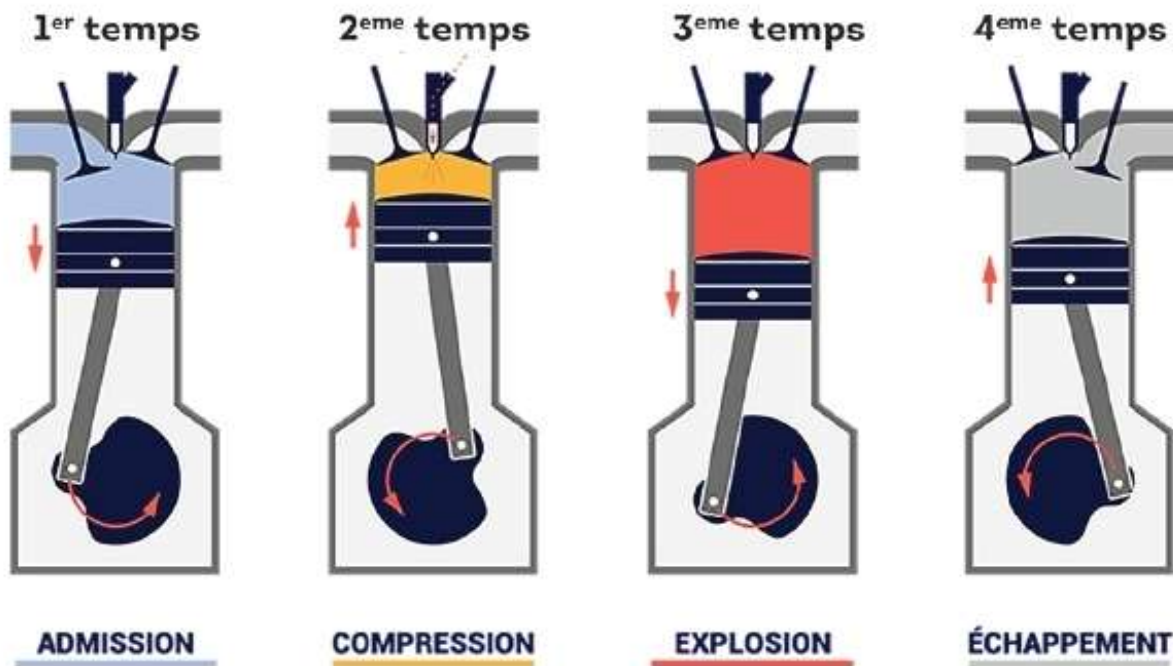
**Alphonse Eugène BEAU
dit BEAU DE ROCHAS**

(1815 - 1893)

Thermodynamicien autodidacte, il décrit en 1862 un cycle à quatre temps, connu sous le nom de cycle de Beau de Rochas, qui lui vaudra d'être reconnu comme l'inventeur du moteur à quatre temps

Cycle du moteur à 4 temps.

Le cycle de Beau de Rochas (ou cycle d'Otto est un cycle thermodynamique théorique. Son principal intérêt pratique réside dans le fait que les moteurs à explosion à allumage commandé, généralement des moteurs à essence tels que ceux utilisés dans les automobiles, ont un cycle thermodynamique pratique qui peut être représenté de manière approchée par le cycle de Beau de Rochas.



Alexander Graham BELL

1847 - 1922

Scientifique, Scotto-canadien naturalisé américain. Il est entre autres l'inventeur du téléphone. Professeur de diction à l'université spécialiste de l'élocution (phonologue) son nom a été donné à l'unité du niveau de pression acoustique.

Le décibel [dB] : unité utilisée pour mesurer l'intensité des sons et celle d'autres grandeurs physiques. Un décibel équivaut à un dixième de bel [B], une unité qui doit son nom à Graham Bell, l'inventeur du téléphone. Son échelle logarithmique permet de représenter le spectre auditif de l'être humain dans son ensemble.

Le décibel, niveau de pression sonore [dB SPL]¹ prend, par convention, comme niveau de référence le plus petit niveau de pression acoustique perceptible à l'oreille humaine. Le plus petit son audible par l'être humain est typiquement de 0 [dB SPL] (seuil d'audition). Dans la pratique, « dB » est souvent utilisé pour « dB SPL ».

$$[\text{dB SPL}] = 20 \log_{10} (P/P_0)$$

avec : P [Pa] pression sonore mesurée et P_0 : pression de référence égale à [μPa].

1. SPL = Sound Pressure Level (Niveau de pression acoustique).

Daniel BERNOULLI

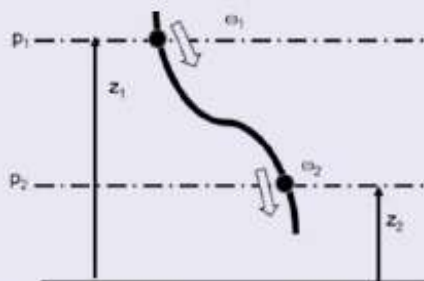
(1700-1782)

Physicien suisse né à Groningen, il est l'un des fondateurs de l'hydrodynamique et de la théorie des gaz. La rue Bernoulli est dédiée à son oncle Bernard Bernoulli qui publia des travaux importants sur le calcul exponentiel.

Formule de Bernoulli. Elle concerne l'écoulement d'un fluide. Pour un fluide incompressible la quantité :

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z$$

qu'on appelle « charge » demeure constante tout le long de l'écoulement. La charge a la dimension d'une longueur. (Hauteur manométrique souvent en [m])



$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) = 0$$

v Vitesse [m/s]

p pression [Pa]

z altitude [m]

ρ masse volumique [kg/m³]

g accélération de la pesanteur (9,81 [m/s²])

Théorème de Bernoulli. La somme des pressions et des énergies mécaniques par unité de volume est constante tout au long d'un tube de courant.

Pression cinétique + pression de pesanteur + énergie de pression : constant

$\rho \cdot (v^2/2g) + p \cdot g \cdot z + p = \text{constant}$ (p désignant la pression statique)

Loi de Bernoulli. C'est une loi de probabilité.

Une épreuve de Bernoulli de paramètre p est une expérience aléatoire comportant deux issues, le succès ou l'échec. L'exemple typique est le lancer d'une pièce de monnaie possiblement pipée. On note alors p la probabilité d'obtenir pile et $1-p$ d'obtenir face.

Joseph Louis François BERTRAND

Polytechnicien, ingénieur des mines.
Professeur de mathématiques et de
physique au Collège de France.

Formule de Bertrand ou formule de Dupré, ou encore de Rankine-Kirchhoff, permet de calculer la pression de vapeur saturante d'un corps pur en fonction de la température. Voir Dupre. On doit aussi à Joseph Bertrand : un postulat et une série.

Jean-Baptiste BIOT

(1774-1862)

Physicien, astronome, mathématicien
français. Un des fondateurs de la
thermique. Ses travaux sur la dilatation
et la conduction l'ont conduit à énoncer
l'équation de la chaleur.

Nombre de Biot :

$$Bi = (h \cdot L) / k$$

est un nombre sans dimension utilisé dans les calculs de transfert thermique en phase transitoire, avec :

h [W / m^2 coefficient d'échange par convection],

L [m] longueur caractéristique de la géométrie,

k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] est la conductivité thermique du corps.

C'est l'un des termes les plus fréquemment rencontrés dans les transferts de chaleur et de mécanique des fluides.

Equation de la chaleur : En mathématiques et en physique, l'équation de la chaleur est une équation aux dérivées partielles parabolique, pour décrire le phénomène de conduction.

$$\rho \cdot c = \delta T / \delta t = K \cdot \delta^2 T / \delta x^2$$

Ludwig Eduard BOLTZMANN

(1844-1906)

Physicien et philosophe autrichien. Père de la physique statistique. Sur la tombe de Ludwig Boltzmann, à Vienne, on peut lire en guise d'épithaphe l'équation qui l'a rendu célèbre

$$S = \log W$$

expression qui relie l'entropie d'une substance (S) au nombre (W) d'états microscopiques de même énergie.

Constante de Boltzmann

Fait le lien entre la température d'un système et son énergie au niveau de l'atome :

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$$

Elle permet de définir l'émittance globale hémisphérique du corps noir (étalon de rayonnement) à une température T (K) qui s'écrit : $MOT = \sigma T^4$ (W/m²)

MOT représente la densité surfacique de flux émis par rayonnement par une surface noire à température T dans toutes les directions de l'espace et toutes les longueurs d'onde.

Equation de Boltzmann ou équation de transport. L'équation de Boltzmann ou équation de transport de Boltzmann décrit le comportement statistique d'un système thermodynamique hors état d'équilibre.

Loi de Boltzmann. La loi de Stefan ou de Stefan-Boltzmann définit la relation entre le

rayonnement thermique et la température d'un objet considéré comme un corps noir. Elle établit que l'exitance énergétique d'un corps en watts par mètre carré est liée à sa température T [K] exprimée en kelvins par la relation :

$$M = \sigma \epsilon \times T^4$$

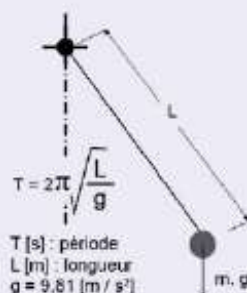
Jean Charles Chevalier de BORDA

Mathématicien, physicien et navigateur. Plusieurs navires de l'École d'Application de Navale portent son nom avant celui de Jeanne d'Arc ainsi qu'un bateau océanographique. Il participa à la mesure du mètre (Quart du méridien terrestre) et à la mise en place du système métrique.

Équation de Borda-Carnot concerne les pertes de charge en mécanique des fluides. Elle vise en particulier les pertes de charge dans les conduites d'eau en fonction des vitesses d'écoulement.

Formule de Borda.

La période d'un pendule simple ne dépend pas de la masse qui lui est accroché mais de sa longueur.



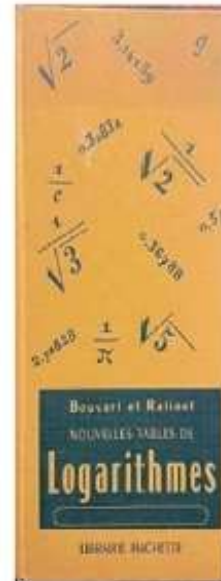
Méthode de Borda, c'est un système de vote pondéré. Ses premières utilisations sont très anciennes, puisqu'elle a été utilisée par le Sénat romain jusqu'à l'an 105. Ce système de vote est très populaire aux États-Unis pour attribuer des prix sportifs. C'est par cette méthode que sont élus, entre autres, le meilleur joueur des Ligues majeures de baseball et l'équipe championne de football américain collégial.

Camille BOUVART

(1837-1918)

et Alfred RATINET

Sont les auteurs d'une célèbre table de logarithmes. Cette table, dont la première édition est antérieure à 1905, était toujours éditée en 1980. Les tables de logarithmes étaient toujours autorisées à une époque récente aux concours des grandes écoles.



Robert BOYLE

(1627-1691)

Physicien et chimiste irlandais. Deux passions régèrent sa vie : le christianisme et la science expérimentale

Loi de Boyle dite de Boyle-Mariotte. Voir Mariotte

Roger CADIERGUES

(1922-2012)

Le Père du Génie Climatique

Polytechnicien, débuta sa carrière au CSTB il créa le COSTIC et est à l'origine de l'ENSAIS, maintenant INSA de Strasbourg. Il était conseiller scientifique de l'AICVF

Le monde du Génie climatique lui doit beaucoup. Il a marqué la communauté professionnelle française et internationale, par ses recherches scientifiques, son savoir étendu, son pragmatisme et sa simplicité. Dès 1947 il donna sa première conférence à l'AICVF.

Polytechnicien il intègre le CSTB en 1947. En 1950 André Missenard lui demande de diriger le Comité des constructeurs d'appareils de chauffage par l'eau et la vapeur qui deviendra le COSTIC

Il en assure la direction de 1950 à 1987. Il a mis en place une passerelle entre le COSTIC et la section Equipements Technique du Bâtiment de l'ENSAIS de Strasbourg. Il était conseiller technique de l'AICVF.

« Son assiduité à la commission devenue plus tard le Comité technique fut exemplaire. Il contribua à la « Collection des guides de l'AICVF », notamment en rédigeant les guides 2 et 2 bis consacrés au calcul des charges de conditionnement d'air. En 2002, il proposa de rédiger un ouvrage sur les déperditions, actualisation rendue nécessaire par la parution à venir d'une norme européenne. Il proposa de saisir cette occasion pour créer la collection « Recommandations de l'AICVF » ainsi que la façon de numérotter chaque ouvrage. Une nouvelle édition fut publiée en 2006. Il a rédigé et mis en page ces 2 ouvrages au moyen de Xpress 6 y compris les dessins, montrant ainsi que ses talents ne s'arrêtaient pas à la climatique.

L'AICVF a pu bénéficier de ses conseils concrets basés sur sa longue expérience dans nos techniques et nos métiers. Les palettes de ses domaines d'excellence furent multiples : il a mis en place les premiers enseignements pour ingénieurs en génie climatique et énergétique avec l'ENSAIS, maintenant INSA Strasbourg, initié les formations continues au COSTIC, créé les premiers logiciels techniques dès la fin des

années 60, lancé les outils et les actions pour économiser l'énergie, dès les années 70, tout en continuant à mener des recherches scientifiques. Communicant de talent, il a créé des périodiques comme PROMOCLIM, rédigé plusieurs ouvrages, des chroniques et quantité de publications. Les 2 tomes de MEMOCLIM ont été ses derniers ouvrages (COSTIC Publications). Son expertise de haut vol lui a donné une faculté hors du commun : éclairer l'avenir.

La troisième édition de sa recommandation (Recommandation AICVF 01-2019) lui est dédiée. C'est pour l'AICVF l'occasion de lui rendre hommage. »

(Texte de Jean LANNAUD -
Président du Comité technique de l'AICVF)

Le prix « Roger CADIERGUES - jeune ingénieur » de l'AICVF récompense le travail des étudiants en fin de scolarité d'école d'ingénieur ou master. Ce concours national, piloté par la commission enseignement de l'AICVF propose de récompenser les meilleurs mémoires réalisés dans le cadre du stage de fin d'étude ou de master.

La vitesse silencieuse. Le concept de « vitesse silencieuse » est associé à des formules empiriques dues à Francis Croquelois (Ingénieur à la DETN-GDF) et développé par Roger Cadiergues au Costic. La formule empirique de Croquelois est utilisée en mécanique des fluides pour calculer en particulier la vitesse optimale d'écoulement de l'eau des circuits de chauffage dans les tubes afin de minimiser le bruit, permettre une purge efficace et éviter l'embouage.

$v = (d/50)^{1/2}$ avec v [m/s] et d [mm]

Nicolas Léonard Sadi Carnot

(1796 - 1832)

Deux Sadi Carnot sont célèbres. Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 - 1832) physicien français et François Sadi Carnot (1837 - 1894) homme politique qui fut Président de la République, neveu du physicien.

Principe et théorème de Carnot. A l'instar de Copernic, Sadi Carnot ne publia qu'un seul livre (voir extrait plus loin), les *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (Paris, 1824), dans lequel il exprima, à l'âge de 27 ans, ce qui s'avéra être le travail de sa vie. Dans cet ouvrage il posa les bases d'une discipline entièrement nouvelle, la thermodynamique. À l'époque d'ailleurs, le terme n'existait pas et c'est William Thomson qui l'inventa au milieu du XIX^{ème} siècle.

Pourtant c'est bien Sadi Carnot, malgré l'imprécision de certains de ses concepts, son acceptation de la « théorie du calorique » et de l'axiome de la conservation de la chaleur, qui a créé cette science aussi fondamentale du point de vue théorique que féconde en applications pratiques. Il formula l'exposé raisonné du moteur thermique et les principes de bases selon lesquels toute centrale énergétique, toute automobile, tout moteur à réaction est aujourd'hui conçu. Plus remarquable, cette genèse se fit alors qu'aucun prédécesseur n'avait encore défini la nature et l'étendue du sujet. En s'appuyant sur des préoccupations purement techniques, comme l'amélioration des performances de la machine à vapeur, le cheminement intellectuel de Sadi Carnot est original et annonce des évolutions importantes qui intervinrent à cette époque charnière pour la science moderne.

Rappelons que la thermodynamique est l'étude des rapports entre les phénomènes thermiques et mécaniques. Le principe de base de la thermodynamique est celui de la conservation de l'énergie interne de tout système tant qu'il n'y a pas échange de travail ou de chaleur avec un autre système.

Principe de Carnot. Le principe de Carnot constitue l'un des énoncés du second principe de la thermodynamique. C'est en 1824 que Carnot fit connaître sa théorie du cycle. (De Carnot)

voir que du travail ($W > 0$) et céder de la chaleur ($Q < 0$)

Lord Kelvin donna en 1851 l'énoncé suivant du principe de Carnot : « Il est impossible de transférer de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud sans quelque autre changement simultané. »

Un second énoncé équivalent est donné par Clausius : « Il est impossible de prendre de la chaleur à un système et de la convertir en travail sans quelque autre changement simultané dans le système. » Ceci autorise le cycle de Carnot car celui-ci ne crée du travail qu'en transférant de la chaleur à une source froide.

Un troisième énoncé est donné par Ostwald : « Le mouvement perpétuel de seconde espèce est impossible ; il s'agirait d'une machine qui fonctionnerait sans différence de température.

Théorème de Carnot. Le théorème de Carnot vise le rendement thermique d'une machine c'est-à-dire le rapport de l'énergie fournie à l'énergie dépensée.

Le rendement d'un cycle ditherme¹ irréversible est inférieur à celui d'un cycle ditherme réversible qui fonctionnerait entre les mêmes sources de chaleur.

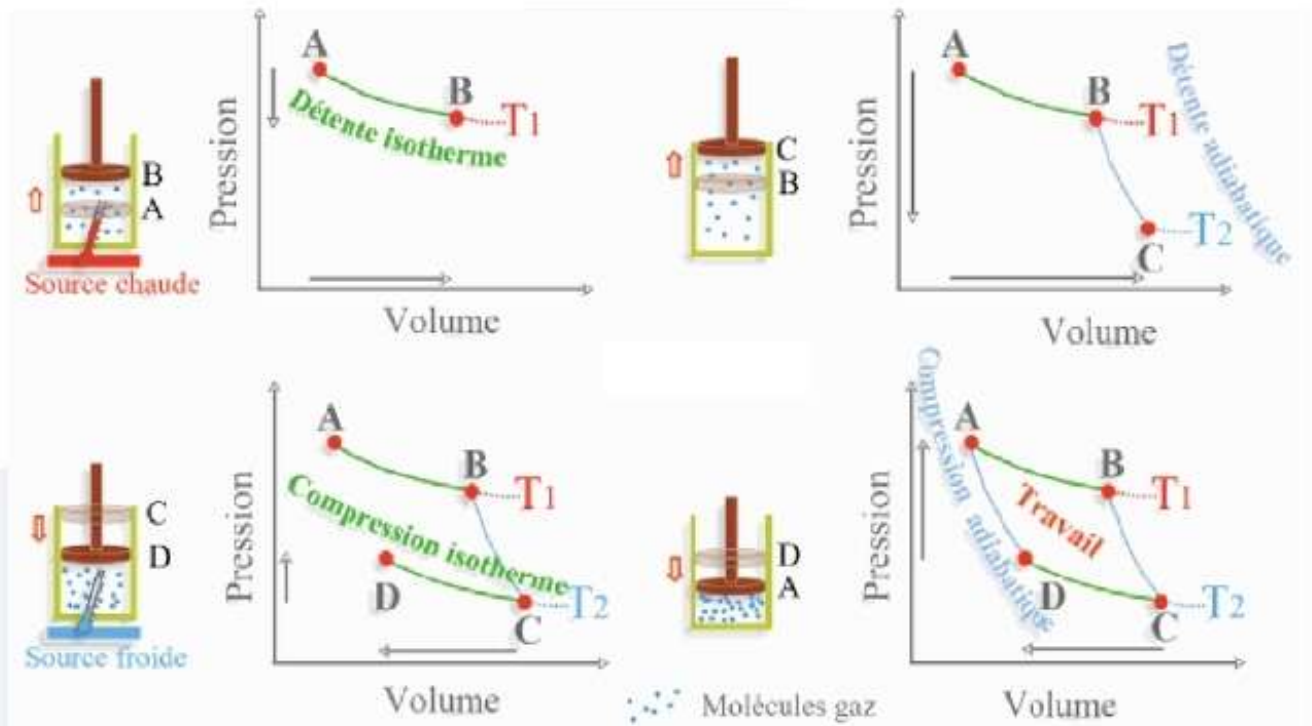
$$Q_c/T_c + Q_f/T_f = 0$$

ou

$$\Delta(Q/T) = 0$$

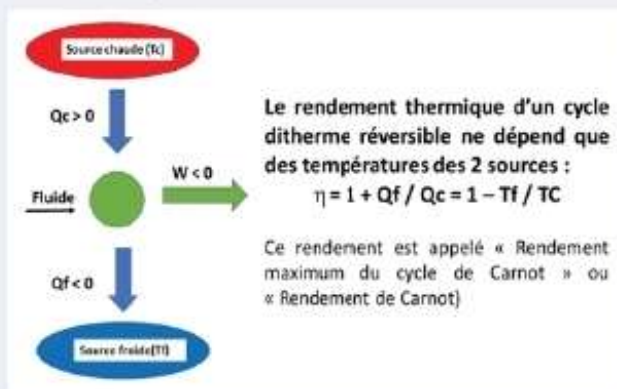
Clausius a généralisé ce résultat et a montré que le rapport Q/T correspond à la variation d'une fonction d'état qu'il a appelé « entropie » et désigné par S [J/K].

¹ Ditherme : cycle thermodynamique au cours duquel le système échange de la chaleur avec 2 sources.



Cycle de Carnot. Cycle thermodynamique pour un moteur ditherme constitué de 4 processus réversibles :

- Une détente isotherme réversible.
- Une dilatation adiabatique réversible (donc isentropique).
- Une compression isotherme réversible.
- Et une compression adiabatique réversible.



Rendement de Carnot. Le rendement d'une machine est le rapport de l'énergie fournie à l'énergie dépensée. Le rendement d'un cycle ditherme irréversible est inférieur à celui du cycle ditherme qui fonctionnerait entre les mêmes sources de chaleur.

Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance par Sadi Carnot publiées en 1824. En voici un extrait :

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 tous 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.

C'est dans cet immense réservoir que nous pouvons puiser la force mouvante nécessaire à nos besoins ; la nature, en nous offrant de toutes parts le combustible, nous a donné la faculté de faire naître en tout temps et en tous lieux la chaleur et la puissance motrice qui en est la suite. Développer cette puissance, l'approprier à notre usage, tel est l'objet des machines à feu.

L'étude de ces machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours.

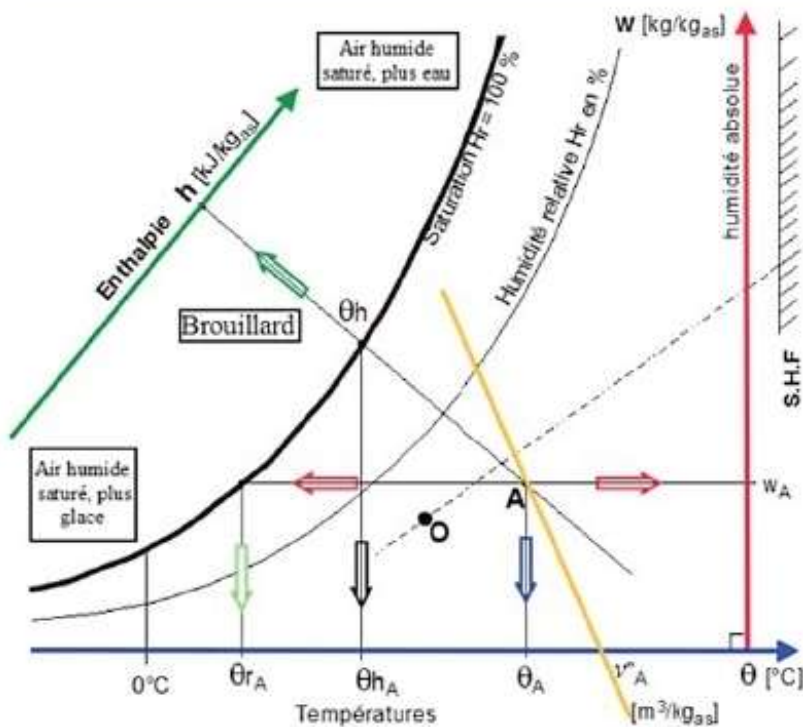
Willis Havilland CARRIER

(1876-1950)

Ingénieur américain. Il est considéré comme l'inventeur du conditionnement d'air. Il réalisa que le renouvellement de l'air d'un local devait à la fois assurer : le contrôle de la température, le contrôle de l'hygrométrie de l'air, le débit de renouvellement de l'air, la filtration de l'air neuf.

Diagramme psychrométrique¹ de Carrier. Pionnier du conditionnement d'air aux Etats-Unis, W. H. Carrier a publié un diagramme de l'air humide en température et humidité (dit en « t, x ») connu sous le nom de « Psychrometric Chart ». Le diagramme type Carrier est utilisé en France pour étudier l'évolution de l'air des ambiances par exemple dans sa forme Véron - Casari (Voir Casari). En Allemagne et dans les pays de l'Est on utilise principalement des diagrammes de la forme Mollier (Voir Mollier) qui sont des diagrammes en enthalpie et humidité (« h, x »).

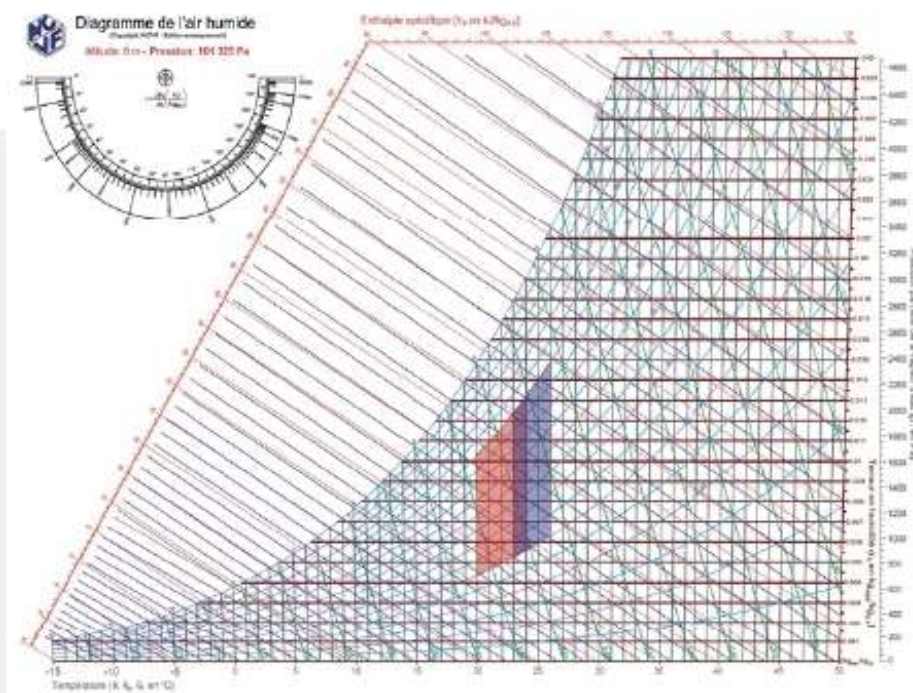
1. La psychrométrie est l'étude des propriétés thermodynamiques de l'air humide. Cette appellation (du grec « psychro » froid) a pour origine la méthode de détermination de l'humidité de l'air à l'aide de thermomètres à bulbe sec et à bulbe humide. Le thermomètre humide subit l'influence du refroidissement adiabatique. L'écart des températures indiquées par les 2 thermomètres est appelé écart psychrométrique qui permet de déterminer l'humidité de l'air grâce à des tables ou en utilisant un diagramme de l'air humide.



Roger CASARI

1927 - 2022

Ingénieur français spécialisé en thermique du bâtiment, co-auteur avec Marcel Véron du diagramme de l'air humide dit *Casari-Véron*, outil de référence en génie climatique

**Diagramme de l'air humide dit de l'AICVF¹**

Le diagramme de l'air humide est une vieille tradition à l'AICVF. Ce diagramme a été créé par Marcel Veron et Roger Casari. Roger Casari était en 1957, assistant de recherche de Marcel Veron, au laboratoire de thermique du CNAM. Son témoignage a été donné dans l'ouvrage du centenaire de l'AICVF. Il est donné sur le site de votre association. L'impression du diagramme a été assurée par l'IGN (Institut Géographique National) sous le contrôle de Roger Casari. Il a été édité en deux versions, à savoir enthalpie spécifique en kJ/kg et enthalpie en Wh/kg. Ces deux versions étaient entièrement graphiques et tracées point par point. Le format de 60 x 68,5 cm s'avérait difficile à utiliser. Une nouvelle édition a été mise à l'étude, mais la numérisation des moyens à l'IGN a rendu impossible l'édition au format A3 souhaité par l'Éducation nationale. Cette fois, la version est entièrement numérique en

utilisant les formules de Roger Cadiergues (voir à ce sujet le cahier des équations sur le site aicvf.org). Le passage à une version numérique a permis de réaliser des versions en altitude. Le diagramme est téléchargeable sur le site AICVF en version enseignement, aux formats A3 et A4 au format PDF au niveau de la Figure 2 Vue A5 du diagramme de l'air humide (version enseignement) : altitude 0, avec indication des zones de confort suivant la norme NF EN ISO 7730, mer (101325 Pa); - en différentes versions pour l'usage personnel des membres, en accès réservé et aux formats A3 et A4 toujours au format PDF; au niveau de la mer (101325 Pa), altitude 750 m (92 633 Pa), altitude 1 500 m (84 556 Pa), altitude 2 000 m (79 495 Pa), altitude 2 500 m (74 682 Pa). Pour ceux qui ne se contenteraient pas de ces versions, un utilitaire de calcul sous Excel est à leur disposition. Il suffit d'afficher deux valeurs à l'altitude désirée. Il nous faut aussi remercier Sacha Petrovic, l'auteur de ces nouvelles versions. Il a été récompensé par le Prix spécial du Jury de l'AICVF en 2011.

1. « Le nouveau diagramme de l'air humide de l'AICVF ». Article de Jean Lannaud Président du Comité technique de l'AICVF publié dans CVC n° 880 de juil./oct. 2013.

**Pierre CASATI
et Jean-Pierre CRISTIN
(1883-1755)**

Le thermomètre de Lyon. Pierre Casati, verrier à Lyon et Jean-Pierre Cristin, mathématicien, sont-ils à l'origine du célèbre thermomètre ?

On croyait jadis à une chaleur naturelle et à une chaleur contre nature ; que le froid et le chaud étaient des matières réelles qui s'équilibraient à la surface de la terre ; que la température du corps humain était plus élevée chez les habitants des tropiques que chez eux des régions tempérées, etc... Au XVIII^e siècle, la mise au point du « Thermomètre universel » marque l'éveil de l'esprit scientifique appuyant ses raisonnements sur l'expérimentation et la mesure. Mais imagine-t-on l'incroyable difficulté pour définir la température alors qu'on ne peut ni l'additionner, ni la soustraire comme on le fait avec la longueur ou le poids ? Et si les noms de Réaumur et Fahrenheit nous sont encore familiers, se rappelle-t-on ceux de deux Lyonnais, Christin et Casati, véritables inventeurs de ce thermomètre universel ?

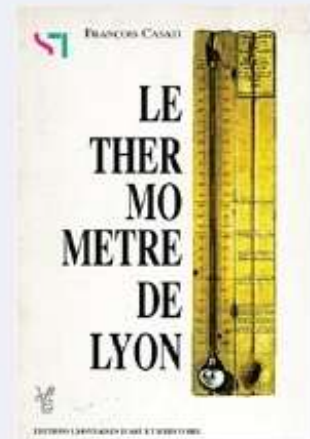
L'ouvrage de François Casati retrace depuis les origines, l'aventure exceptionnelle de cette découverte dans le climat intellectuel lyonnais du XVIII^e siècle. Christin procède à des relevés météorologiques depuis de nombreuses années. Il n'est pas satisfait de ses mesures qu'il ne trouve ni suffisamment précises ni reproductibles. En 1736, l'observatoire de Lyon reçoit de l'Académie des Sciences de Paris un thermomètre Réaumur. Christin s'en procure deux autres ainsi que deux thermomètres à mercure. Au cours de la séance de la Société Royale du 14 septembre 1740, il fait part de ses observations dans une note intitulée « Des thermomètres » qu'il conclut ainsi :

« Pour construire de bons thermomètres, je n'ose m'en assurer qu'après des observations et des expériences qui me restent à faire [...] et le mercure y sera préférable à l'esprit de vin. »
C'est dans ce contexte que Jean-Pierre

Christin, qui a le même âge que Réaumur, « se mit en état de perfectionner les thermomètres de mercure, connus sous le nom de thermomètres de Lyon, selon les principes de Mr de Réaumur. Il forma à cette nouvelle construction un Italien, le sieur Pierre

Casati, dont les ouvrages en ce genre ont mérité l'approbation publique »⁵.

Le résultat de ces recherches est présenté le 19 mai 1743 devant la Société Royale des Beaux-Arts : un nouveau thermomètre à mercure est né avec une échelle divisée en 100 degrés dont le zéro est fixé à la température de la glace fondante et le 100 à celle de l'ébullition de l'eau. Christin le qualifie de **centigrade**. En juillet 1743, Christin fait dans les journaux la publicité du **Thermomètre de Lyon, divisé selon la dilatation du mercure**. Il écrit humblement : « Si le public veut adopter la nouvelle division en 100 degrés, je pense qu'il fera bien, et si au contraire il ne le veut pas, je n'en serai pas fâché ; j'aurai toujours la satisfaction d'avoir fait de mon mieux. » Son invention est effectivement critiquée par ceux qui restent attachés à la grande autorité de Réaumur (p.110)¹. Le thermomètre conçu par Christin est produit à partir de 1743 par Pierre Casati, artisan verrier lyonnais établi dans le quartier de la Guillotière. Le **Thermomètre de Lyon** rencontre un vif succès commercial local. Puis, c'est par centaines qu'il se vend à Paris, dans le Dauphiné, en Provence et dans d'autres villes d'Europe.



Anders CELSIUS

(1701-1744)

Astronome et physicien suédois

On lui doit, en particulier, l'échelle de température Celsius.

Échelle thermométrique centésimale.

L'échelle thermométrique « centésimale » (parfois dite centigrade) est maintenant dénommée « Celsius » (Décret du 3 mai 1961)

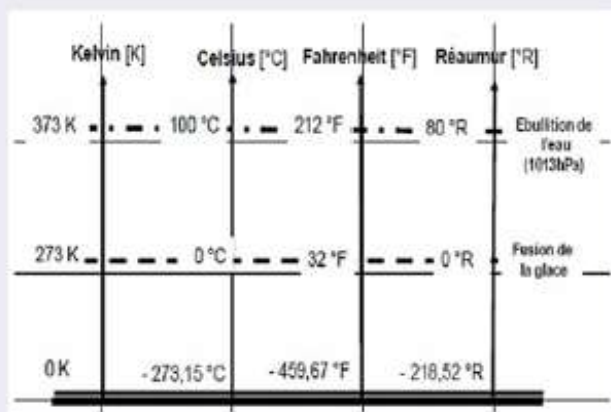
La température Celsius t [°C], qui s'exprime en degrés Celsius [°C] est définie par la différence :

$$t = T - T_0 \text{ [°C]}$$

entre deux températures thermodynamiques T et T_0 [°C] avec $T_0 = 273,15$ kelvins (Voir Kelvin). Les températures Celsius, déduites de l'échelle thermodynamique Kelvin, sont déterminées selon l'échelle internationale pratique de températures et conformément aux règles fixées par la conférence des poids et mesures.

Le zéro est la température la plus basse qui puisse exister. Il correspond à la limite basse de l'échelle de température thermodynamique, soit l'état dans lequel l'enthalpie et l'entropie d'un gaz parfait atteint sa valeur minimale, notée 0. Cette température théorique est déterminée en extrapolant la loi des gaz parfaits (Voir Mariotte) : selon un accord international, la valeur du zéro absolu est fixée à $-273,15$ [°C] (Celsius) ou $-459,67$ [°F°]. Par définition, les échelles Kelvin et Rankine prennent le zéro absolu comme valeur 0.

Intervalle de température : l'unité degré Celsius [°C] est égale à l'unité kelvin [K]. Un



intervalle (ou écart, différence) de température peut s'exprimer en kelvins ou en degrés Celsius.

Pour une ambiance, on distingue plusieurs « températures » :

- **Température sèche ou température de l'air t_a [°C]** : c'est celle qui est lue sur un thermomètre à bulbe sec non soumis au rayonnement. C'est la température de l'air ou température intérieure. « Les températures intérieures sont mesurées autant que possible au centre des pièces à 1,50 mètre environ du sol » - CCTG art. 6.2.2.6 (Note : les températures ne sont pas des grandeurs mesurables, ce sont des grandeurs repérables).
 - **Température humide [°C]** : c'est celle qui est lue sur un thermomètre dont le bulbe est recouvert d'une toile humide (température à laquelle l'eau s'évapore).
 - **Température de rosée [°C]** : ou point de rosée, se reporter au diagramme de l'air humide.
 - **Température radiante moyenne t_r [°C]** : ou température moyenne de rayonnement. En un point, elle se calcule en pondérant les températures superficielles θ_i de toutes les surfaces vues par les valeurs de ces surfaces. $t_r = \Sigma(\theta_i \cdot S_i) / \Sigma S_i$
 - **Température résultante sèche t_{rs} [°C]** : c'est la moyenne arithmétique de la température sèche de l'air et la température radiante moyenne. $t_{rs} = (t_a + t_r) / 2$. Le « thermomètre boule » ou « thermomètre Missenard » indique cette température et permet une évaluation du confort.
 - **Température opérative t_o** : C'est un indice utilisé pour évaluer le confort thermique (norme NF X 35-203) : $t_o = (h_a \cdot t_a + h_r \cdot t_r) / (h_a + h_r)$; Dans les cas courants lorsque t_a et t_r sont peu différents : $t_o \approx t_{rs}$
- Nota : la réglementation thermique de puis la RT 2 000 se réfère maintenant à la température opérative (Voir Fanger).

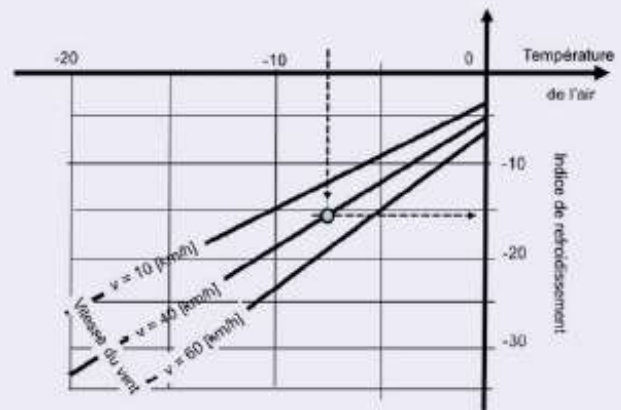
• **Écart de température** : la différence entre deux températures s'exprime en kelvins [K] ou en degrés Celsius [°C] ; le degré Celsius [°C] est réservé aux températures ; la différence entre une température intérieure à 18 [°C] et une température extérieure à - 7 [°C] est de 25 [K]. De même un coefficient U s'exprime en [W/m². K].

Note sur la température ressentie (ou parfois « ressenti »). En météorologie, la température - dite température sous abri - est, par définition, celle lue sur un thermomètre (ou mesuré par une sonde étalonnée à partir d'un thermomètre) placé à 1,5 m du sol dans un abri ajouré. Mais la perception physiologique de la température varie d'un individu à l'autre et selon les conditions atmosphériques (vent, pluie, ensoleillement...). Ainsi, à température donnée, la sensation de froid est plus vive en présence de vent que par temps calme, à cause du refroidissement éolien (Source : Environnement Canada).

Pour annoncer les températures extérieures en hiver les météorologues canadiens et nord-américains calculent une « température ressentie » ou « indice de refroidissement éolien » à l'aide d'une relation mathématique empirique, qui tient compte de la température de l'air et de la vitesse du vent. Cette information est particulièrement utile dans les régions au climat rigoureux (Canada, nord des États-gelures, hypothermie ...).

La température ressentie est parfois annoncée par un nombre faisant croire que c'est une température ; il s'agit d'un indice, et non pas une température. Météo France fait usage de deux indices pour les températures à l'extérieur :

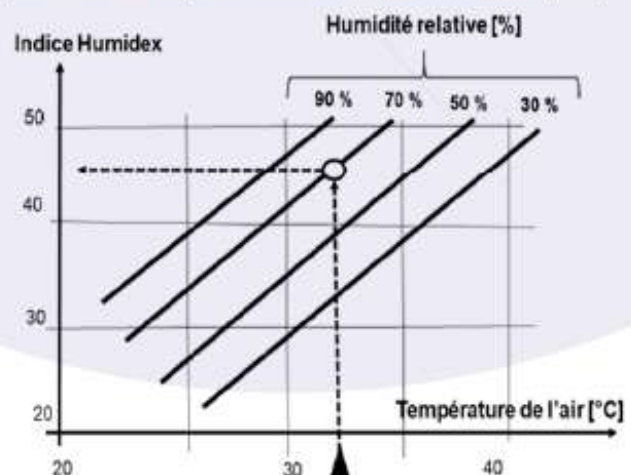
Pour le froid : l'indice de refroidissement éolien (ou de Windchill) traduit la sensation de froid sur la peau. Il dépend du vent et de la température de l'air. Plus le vent est fort, plus l'indice est bas. À Météo France, le Windchill est donné à partir du moment où les températures sont inférieures à 10 [°C].



La température ressentie est définie en fonction :

- de la température extérieure : t_e [°C]
- de la vitesse du vent : v [km/h]

Pour le chaud l'indice Humidex2 qui indique comment l'effet de la chaleur combinée à l'humidité est perçu. Cet indice est donné pour des températures au-dessus de 21 [°C].



D'après Météo France

Pour le chaud, l'indice Humidex de température ressentie est donné en fonction :

- de la température extérieure : t_e [°C]
- de l'humidité relative de l'air [%]

Ces 2 indices (indice de refroidissement éolien et indice Humidex) ne s'appliquent qu'aux températures extérieures.

1. Windchill: logiciel proposé par PTC (Parametric Technology Corporation)

2. L'indice *humidex* est une formule utilisée par les météorologues canadiens pour intégrer les effets combinés de la chaleur et de l'humidité.

3. Les données observées et les simulations des modèles climatiques sont comparées pour évaluer la validité des modèles et estimer les tendances et les projections de température. Le GIEC produit des rapports périodiques, appelés rapports d'évaluation, qui récapitulent les connaissances actuelles sur le climat et fournissent des estimations des températures passées et futures.

4. Il est important de noter que les températures présentées par le GIEC ne sont pas des valeurs absolues, mais plutôt des anomalies de température par rapport à une période de référence spécifique. Cela permet de mieux mettre en évidence les changements climatiques au fil du temps.

En résumé, le GIEC détermine les températures pour le réchauffement climatique en utilisant des données observées et des

modèles climatiques, en évaluant les tendances et les projections à l'échelle mondiale pour fournir des informations basées sur la science sur l'évolution du climat.

Pour la France, la température moyenne a atteint 14,1 °C en 2020 dépassant la « normale » (période de référence 1961-1990) de 2,3 °C. Par rapport à la période 1900-2020 l'année 2020 a été la plus chaude devant 2018 (13,9 °C) et 2014 (13,8 °C).

Autres échelles de température. L'échelle de température la plus répandue est le degré Celsius. En thermodynamique, la température est définie à partir de l'énergie interne d'un système et s'exprime en kelvins [K]. Dans les pays anglo-saxons on emploie le degré Fahrenheit [°F]. Citons pour mémoire le degré Réaumur [°R] et le degré Rankine [°Ra] qui fut utilisé en thermodynamique ($1^{\circ}\text{Ra} = 9/5\text{K}$)

Jacques Alexandre César CHARLES

(1746-1823)

Physicien, chimiste et inventeur français. Il est le premier à faire voler un ballon à gaz gonflé à l'hydrogène.

Loi de Charles C'est une des lois de la thermodynamique constituant la loi des gaz parfaits. Voir *Gay-Lussac*

Cette loi a été publiée pour la première fois en 1802 par Gay Lussac mais elle avait été découverte par Charles en 1787.

A pression P = constante, le volume d'un gaz parfait est directement proportionnel à sa température absolue T [K] :

$$V_1 / T_1 = V_2 / T_2$$

et : $V = V_0 \times [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$ avec $\alpha = f(P)$

Cette loi n'est pas valable aux « hautes pressions ». Lorsque P tend vers 0, α tend vers : $0,003\ 661 = 1 / 273,15$ avec t [°C].

Benoît-Paul-Emile CLAPEYRON

(1799-1864)

Polytechnicien ingénieur des Mines. Scientifique, on lui doit de nombreuses contributions aux lois de la mécanique et de la thermodynamique.

La formule de Clapeyron ou relation ou équation de Clapeyron est une relation permettant de définir l'évolution de la pression d'équilibre en fonction de la température d'équilibre au cours d'un changement d'état physique d'un corps pur. La connaissance expérimentale de cette évolution de la pression en fonction de la température d'équilibre, permet la détermination de la chaleur latente L du changement d'état ou plus généralement du changement de phase.

Formule de Clausius-Clapeyron (ou relation de Clausius-Clapeyron, équation de Clausius-Clapeyron) est une forme simplifiée de la formule de Clapeyron permettant son intégration dans le cas d'un équilibre liquide-va-

peur. Elle fut établie par Clapeyron dès 1834 et retrouvée par Rudolf Clausius en 1850. La formule de Clapeyron permet, entre autres, la détermination expérimentale de l'enthalpie de changement d'état.

Rudolf CLAUSIUS

(1822-1888)

Physicien allemand né à Kolín en Poméranie.
Il introduisit la fonction d'entropie en
thermodynamique entropie

Postulat de Clausius. C'est sur le postulat de Clausius que repose le second principe de la thermodynamique (voir Carnot) :

La chaleur ne passe pas d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud.

Théorème de Clausius. Clausius a généralisé le théorème de Carnot en considérant des échanges de chaleur avec un nombre infini de sources :

L'intégrale de $\int dQ / T$ étendue à un cycle fermé est négative

Ce qui peut s'écrire :

$$\int dQ / T < 0$$

Le symbole \int désigne une intégrale circulaire et signifie que l'intégrale est étendue à un cy-

cle fermé. (Le système revient à un état final identique à l'état initial)

Fonction entropie. Dans une transformation lorsque l'état final (B) est différent de l'état initial (A) la valeur de l'intégrale :

$$\int_A^B = dQ / T$$

ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système.

John DALTON

(1766-1844)

Chimiste et physicien britannique. Il est l'auteur d'une théorie atomique. (Il a laissé son nom au daltonisme dont il était atteint)

Loi de Dalton ou loi des pressions partielles¹ ou encore des mélanges.

A une température donnée, la pression d'un mélange de gaz parfaits est égale à la somme des pressions partielles exercées par chacun des gaz composant le mélange.

$$P = \sum_i p_i$$

1. La pression partielle d'un composant dans un mélange de gaz parfaits est définie comme la pression qui serait exercée par les molécules de ce composant s'il occupait seul, tout le volume offert au mélange, à la température de celui-ci.

Henri Philibert Gaspard DARCY

(1803-1851)

Hydraulicien français, Ingénieur général des Ponts et Chaussées, on lui doit l'adduction d'eau et le passage du chemin de fer à Dijon. Il a laissé la loi de Darcy et l'équation de Darcy-Weisbach

Loi de Darcy. Concerne le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du substrat et par le gradient de pression du fluide.

Equation de Darcy-Weisbach¹. En dynamique des fluides c'est une équation phénoménologique². Relation entre la perte de charge à celle due au frottement sur une longueur donnée de conduite.

$$\Delta h / L = f_D \cdot \frac{1}{2} g \cdot V^2 / D$$

Δh [m] : Perte de charge due au frottement.

f_D [sans unité] : Facteur de friction de Darcy.

L [m] : Longueur de la conduite.

D [m] : Diamètre de la conduite.

V [m/s] : Vitesse moyenne d'écoulement.

1. Julius Weisbach (1806-1871). Ingénieur des Mines allemand et mathématicien.

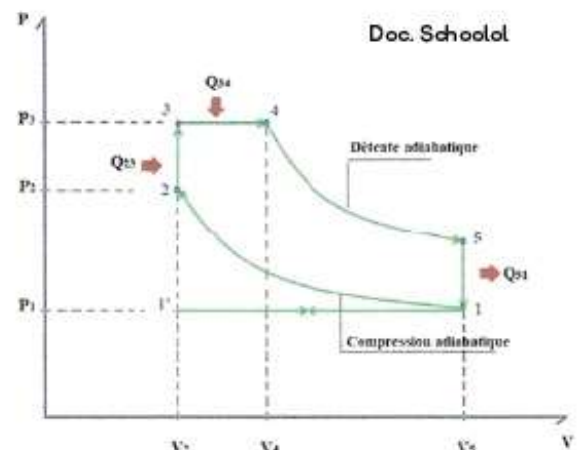
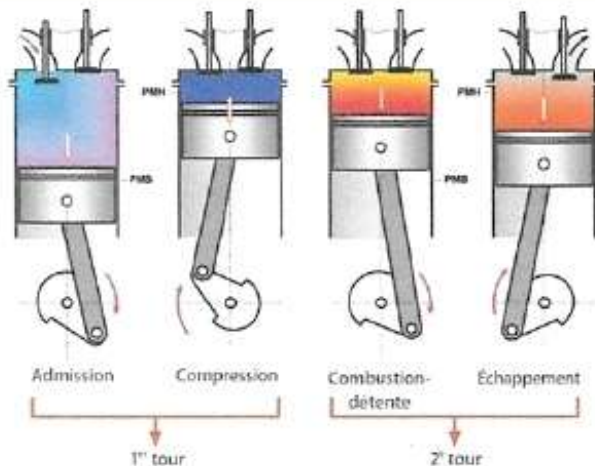
2. Phénoménologique : Relatif ou propre aux phénomènes, qui se fonde sur l'observation des phénomènes, sur les données de l'expérience.

Rudolf Kristian Karl DIESEL

(1858-1913)

Ingénieur allemand né à Paris de parents immigrés allemands et disparu lors d'une traversée en mer du Nord

Cycle Diesel. Le cycle Diesel est un processus de combustion d'un moteur alternatif à combustion interne. Dans celui-ci, le carburant est enflammé par la chaleur générée lors de la compression de l'air dans la chambre de combustion, dans laquelle le carburant est ensuite injecté.



1. La soupape d'admission s'ouvre alors que le piston descend du PMH au PMB. L'air poussé par la pression atmosphérique entre alors dans le piston.

2. Les deux soupapes sont fermées ; le piston monte du PMB au PMH. Il comprime alors l'air admis dans le cylindre lors du temps précédent. L'air contenu dans le cylindre est porté à une température d'environ 600° par le fait qu'on le comprime.

1. PMH et PMB : point mort haut et point mort bas.

3. Lorsque le piston arrive au PMH le gazole est introduit sous pression dans le cylindre. La haute température de l'air comprimé. La température élevée du mélange comprimé provoque l'inflammation spontanée du carburant

4. La soupape d'échappement s'ouvre alors que le piston remonte du PMB au PMH, les gaz brûlés sont alors chassés par le piston.

James DEWAR

(1842-1923)

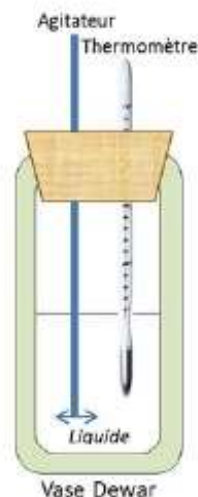
Chimiste et physicien britannique. Il est célèbre par l'invention du vase qui porte son nom et utilisé en particulier dans les calorimètres

Vase calorimétrique DEWAR ou Bombe calorimétrique.¹ Le calorimètre est utilisé pour mesurer les échanges de chaleur lors de changement d'état ou de réaction chimique et en particulier pour déterminer les pouvoirs calorifiques (pouvoir thermique, voir ci-après). La pièce essentielle du calorimètre est le vase.

1. Calorimètre et bombe calorimétrique : Voir Berthelot

Note sur la calorie: La **calorie** est une ancienne unité d'énergie. C'était la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau liquide de $14,5$ à $15,5$ °C. Elle valait environ $4,1855$ [J] joules. Le décret sur les unités légales a précisé : « L'emploi de la calorie, de la thermie et de la frigorie devra cesser avant le 31 décembre 1977. »

C'était il a presque 50 ans ! On parle encore de « calories » au lieu de dire chaleur, ou quantité de chaleur... de calorimètre ou encore de « pouvoir calorifique » au lieu de « pouvoir thermique » Et en diététique... La valeur énergétique d'un aliment qui correspond à la quantité de chaleur dégagée par sa combustion, on utilise pour la kilocalorie (Kcal) au lieu du kilojoule [kJ].



Pierre Louis DULONG

(1785-1838)

Chimiste et physicien français, travaux sur la chaleur spécifique, la dilatation et l'indice de réfraction des gaz.

&

Alexis Thérèse PETIT

(1791-1820)

Physicien français, travaux sur la chaleur.

Loi de Dulong et Petit. La loi stipule, que les capacités calorifiques molaire C et massique C_m , de tout solide à haute température sont :

$$C = 3R \text{ et } C_m = 3R/M,$$

où R est la constante des gaz parfaits et M la masse molaire.

Dilatation des solides. (Lois empiriques souvent désignées de Dulong & Petit)

Dilatation linéique. λ [K^{-1}] : Coefficient de dilation ou rétraction sous une direction axiale correspond à une variation relative de longueur sous l'effet d'une variation de température t [K]

$$L = L_0(1 + \lambda \cdot t)$$

Dilatation volumique. k [K^{-1}] : Coefficient de dilatation volumique (ou cubique) d'une unité de volume d'un matériau sous l'effet d'une variation de température t [K]. Le coefficient de dilatation thermique de certains liquides - comme l'eau - peut varier avec la température.

$$V = V_0(1 + k \cdot t)$$

On vérifie que $k = 3 \times \lambda$.

Louis Victoire Anatase DUPRE

(1808-1865)

Mathématicien et physicien français. Laisse son nom à une formule donnant une expression de la pression de vapeur saturante d'un corps pur.

Formule de DUPRE. La formule de Dupré permet de calculer la pression de vapeur saturante d'un corps pur en fonction de la température, elle est aussi connue sous le nom **de formule de Bertrand ou formule de Duperray ou encore Rankine-Kirchhoff**. Formule empirique permettant de calculer la pression de vapeur saturante en fonction de la température. Cette formule est :

$$\log(p_s) = \alpha - \beta/T - \gamma \log(T)$$

T [K] : température

p_s [Pa] : pression de saturation

α , β , γ sont des coefficients qui dépendent de la nature du fluide.

Pour l'eau (la formule est souvent dite de Dupré) :

$$p_s [\text{atm}] = (t [^\circ\text{C}]/100)^4$$

Albert EINSTEIN

(1879-1955)

Physicien allemand, Albert Einstein est aujourd'hui considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'histoire, connu notamment pour ses théories de la relativité restreinte et de la gravitation. Ses théories sur les relativités restreinte et générale ont bouleversé le monde de la physique.

La relativité $E = m \cdot c^2$

L'histoire de la physique est ponctuée de grandes percées intellectuelles, qui se caractérisent notamment par quelques équations très célèbres. Sans doute la plus connue est celle d'Albert Einstein en 1905, qui formule une équivalence entre :

l'énergie E [J] et la masse m [Kg] multipliée par le carré de la vitesse de la lumière [m/s²]

Daniel Gabriel FAHRENHEIT

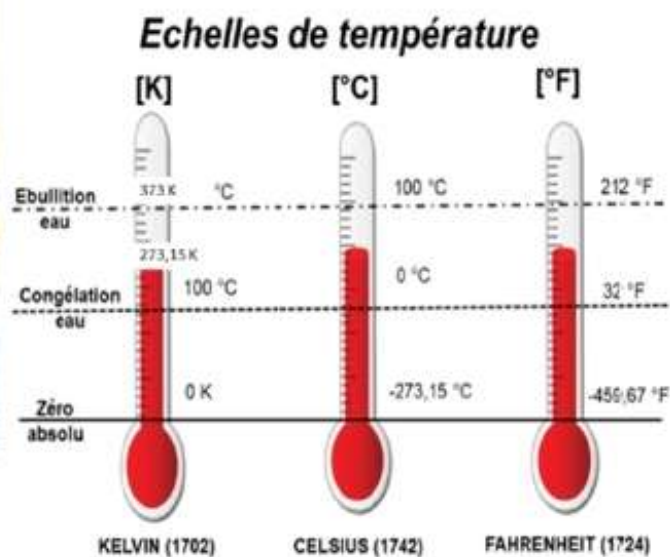
(1686 -1736)

Physicien allemand à l'origine de son échelle de température

L'échelle Fahrenheit [°F] a 2 points fixes, la température de la glace fondante et celle du corps humain. Fahrenheit a également mis au point un hygromètre et une machine à pomper l'eau des polders. L'échelle Fahrenheit utilisée en France jusqu'à la Révolution et demeure officielle aux Etats-Unis.



Le monument Gdansk Fahrenheit montre un thermomètre antique pour se souvenir de l'homme



Povl Ole FANGER

(1934-2006)

Professeur à l'Université Centre International pour l'environnement et l'énergie de Copenhague Danemark. Ses travaux portèrent sur le confort thermique (il est à l'origine de la norme NF EN ISO 7730) et sur le confort olfactif de l'air intérieur. A ne pas confondre avec la QAI. PO Fanger était membre d'honneur de l'AICVF.

PMV Indice d'évaluation du confort thermique.

Le confort thermique, c'est la satisfaction d'un individu vis-à-vis des conditions thermiques de son environnement.

On parle de confort thermique lorsque la personne ne souhaite avoir ni plus chaud, ni plus froid. Il est basé sur 6 paramètres :

- température de l'air ambiant [°C].
- température moyenne de rayonnement des parois de l'environnement [°C].
- humidité spécifique de l'air.
- vitesse de l'air [m/s].
- résistance thermique de l'habillement [clo]
- métabolisme énergétique de l'individu [met].

L'indice **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)** prédit quantitativement le pourcentage de personnes insatisfaites, car trou-

vant l'ambiance thermique trop chaude ou trop froide et qui voteraient -3, -2, +2, +3.

L'OLF est une unité qui quantifie la source de pollution atmosphérique perçue. Les humains perçoivent l'air par leur sens olfactif et chimique, étant sensibles aux odeurs et aux irritants dans l'air. Un olf est la pollution de l'air d'une personne standard

Deux nouvelles unités sont introduites : l'olf et le décipol qui quantifient la pollution de l'air telle que perçue par l'homme à l'intérieur et à l'extérieur. Les sources de pollution de l'air sont quantifiées par l'unité olf. Un olf est l'unité de pollution de l'air d'une personne standard. La pollution de l'air perçue est quantifiée par l'unité décipol. Un décipol est la pollution causée par une personne standard (un OLF) ventilée par un débit d'air neuf de [10 l/s]

Jean-Baptiste Joseph FOURIER

(1768-1830)

Mathématicien et Physicien français. Il a déterminé, par le calcul, la diffusion de la chaleur en utilisant la décomposition d'une fonction périodique en une série trigonométrique, qui sous certaines conditions, converge vers la fonction. Il est aussi l'un des premiers à avoir évoqué la notion d'effet de serre pour l'atmosphère terrestre. A donné son nom aux séries de Fourier.

Loi de la conduction de Fourier. Fourier a découvert que le flux de chaleur qui traverse un matériau d'une face A à une face B est toujours proportionnel à l'écart de température entre les 2 faces : Si le matériau a une température homogène (pas d'écart de température), il n'y a pas de flux de chaleur. La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse, et est décrite par la loi dite de Fourier établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822 : la densité de flux thermique est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda (\text{grad } T)$$

Φ [W/m²]; λ [W m⁻¹ K⁻¹]; T [K]

La loi de Fourier définit le vecteur de densité de flux, c'est-à-dire la valeur mais aussi la direction et le sens de la densité de flux (toujours du chaud vers le froid ce qui explique

le signe (-). La constante de proportionnalité λ est nommée conductivité thermique du matériau. Elle est toujours positive.

Galileo GALILEE

(1564-1642)

Savant italien. Mathématicien, géomètre, physicien astronome et écrivain. Galilée introduisit l'emploi de la lunette en astronomie (1609) il a été à l'origine d'une révolution dans l'observation de l'Univers. Il découvrit entre autres : le relief de la lune

Galilée confirme que la Terre tourne autour du Soleil. Il fait une découverte majeure en 1610 en observant que des étoiles tournent autour de Jupiter. Ses travaux s'opposent donc au géocentrisme d'Aristote selon lequel la Terre est l'axe central autour duquel tournent tous les astres. Ce qu'il lui valut d'être condamné pour hérésie à la prison à vie (transformé en résidence surveillée) il aurait murmuré : « Eppur si muove ! » : Et pourtant elle tourne. Il a été condamné « *pour avoir tenu pour véritable la fausse doctrine enseignée par aucun que le soleil est le centre du monde.* »

Loi de Galilée (de la chute des corps)

$$v = g \times t \quad \text{avec : } v \text{ [m/s] ; } g \text{ [m/s}^2\text{] ; } t \text{ [s]}$$

C'est en 1604, que Galilée énonce ce que certains considèrent comme la première loi de la physique moderne. Selon la loi de la chute des corps : « lorsqu'ils tombent dans le vide, tous les corps tombent à la même vitesse, quelle que soit leur masse »

Échappement d'horloge à pendule (1637)

C'est la première conception d'une horloge à pendule. Comme Galilée était alors aveugle, il a décrit l'appareil à son fils Vincenzo qui en a dessiné un croquis. Le fils a commencé la construction d'un prototype, mais lui et

Galilée sont morts avant qu'il ne soit terminé.

Thermomètre de Galilée à boules

Utilise la variation de la masse volumique en fonction de la température. Principe de fonctionnement : déplacement des boules qui ont chacune un liquide de densité différente. Selon la température, la densité du liquide contenu dans la colonne subit des changements de température et sa densité se modifie. Les boules vont alors monter ou descendre pour atteindre une position où leur densité est égale à celle du liquide de la colonne. La température est indiquée par la boule la plus basse des boules situées en haut de la colonne.



Louis Joseph GAY-LUSSAC

(1778-1850)

Chimiste et physicien français connu pour ses travaux sur les propriétés des gaz. Polytechnicien et membre de l'Académie des sciences. Il a été assistant de Berthollet et de Laplace.

Loi de Gay-Lussac nom également donné à la **loi de Charles**.

A volume constant V [m³] la pression d'un gaz parfait est directement proportionnelle à sa température absolue T [K]

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2$$

On peut écrire pour un gaz à la température t_0 [°C] et à la pression P_0 [Pa]:

$$P = P_0 \times [1 + \beta \times (t - t_0)] \text{ avec } \beta = 0,003661 = 1 / 273,5$$

Le nom de la loi de Gay Lussac est également donné à la loi de Charles relative au volume d'un gaz parfait et sa température à pression constante. La loi de Charles a été énoncée la première fois en 1802 par Gay-Lussac mais

avait été découverte par Charles en 1787. Le nom de loi de Charles est réservée à la relation volume - température à pression constante et loi de Gay-Lussac à celle pression température à volume constant.

Donald Arthur GLASER

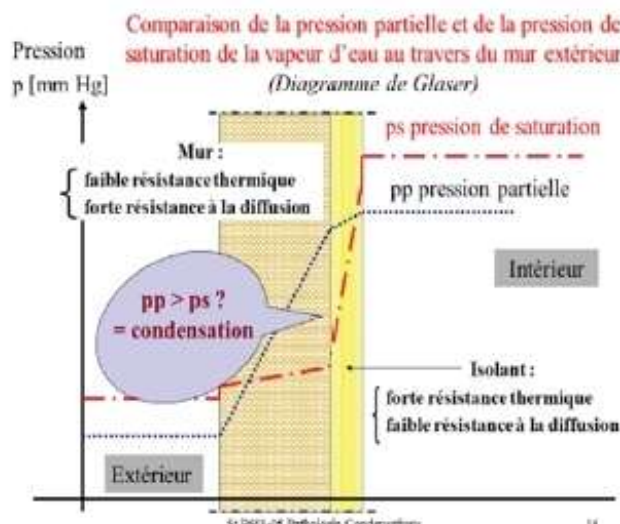
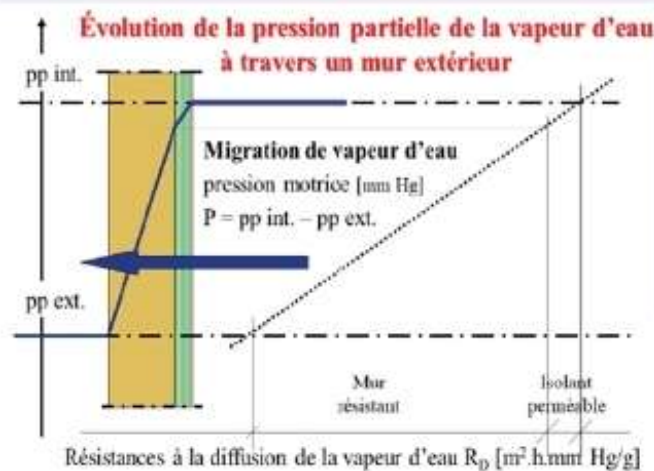
(1926-2013)

Physicien et neurologue américain. Il aurait laissé son nom au tracé du diagramme qui porte son nom relatif à la migration de la vapeur d'eau au travers d'une paroi.

Diagramme de Glaser. Les parois de bâtiments séparent deux ambiances dont l'air est à des conditions hygrothermiques différentes. Lorsque les conditions sont réunies, il y a un risque de condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air, et ce, à l'intérieur des parois ou sur leurs parements. Le diagramme de Glaser permet d'estimer graphiquement le risque de condensation en confrontant la pression de vapeur saturante et la pression partielle de vapeur à l'interface des composants qui constituent une paroi.

La pression de vapeur saturante dépend de la température de l'air et décroît avec la température. La pression partielle de vapeur, en milieu libre, c'est-à-dire dans les deux ambiances séparées par la paroi, dépend de l'humidité relative de l'air ambiant et de la pression de vapeur sa-

turante. La pression partielle de vapeur dans la paroi dépend directement de la résistance à la migration de la vapeur d'eau de chacun des composants qui constituent la paroi. La loi de Fick, analogue à la loi de Fourier, vise la diffusion de la vapeur d'eau dans un matériau.



Zénobe GRAMME

(1826-1901)

Inventeur belge, à l'origine charpentier, puis électricien, à qui l'on doit une amélioration d'un générateur électrique à courant continu.

Dynamo, machine de Gramme, abréviation de "machine dynamoélectrique". La dynamo désigne une machine électrique, à courant continu, qui fonctionne en générateur électrique. Elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique en utilisant l'induction électromagnétique de façon similaire à une magnéto.

Franz GRASHOF

(1826-1893)

Ingénieur allemand, professeur en génie mécanique.

Nombre de Grashof [Gr], nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Il permet de caractériser le transfert thermique par convection dû au déplacement naturel d'un fluide, par l'intermédiaire du calcul du nombre de Nusselt.

Le nombre de Grashof est une mesure de l'importance relative de la flottabilité (terme de poussée) par rapport à la viscosité dans un fluide.

En fait, aujourd'hui on n'utilise plus tellement le nombre de Grashof. On lui préfère le nombre de Rayleigh ($Ra = Pr \cdot Gr$) qui a un réel sens physique car il fournit en fait l'ordre de grandeur de l'épaisseur des couches limites thermiques en convection naturelle ce qui permet d'accéder au nombre de Nusselt et donc à l'échange convectif à la paroi.

Le nombre de Rayleigh est un nombre adimensionnel qui combine les effets de la flottabilité, de la diffusion thermique (par le nb de Prandtl), et de la viscosité. Il est utilisé en convection naturelle pour analyser la stabilité thermique et la transition de la convection laminaire vers la convection turbulente.

$$Gr = (g \times \beta \times \Delta T \times L_c^3 \times \rho) / \mu^2 = (g \times \beta \times \Delta T \times L_c^3) / \nu^2$$

avec :

g : accélération de la pesanteur [$m \times s^{-2}$]

β : coefficient de dilatation [K^{-1}]

ΔT : différence de température entre la paroi et le fluide au repos [K]

L_c : longueur caractéristique [m]

ρ : masse volumique du fluide [$kg \ m^{-3}$]

μ : viscosité dynamique du fluide [Pa . s]

ν : viscosité cinématique [$m^2 \times s^{-1}$]

James Prescott JOULE

(1818-1889)

Physicien anglais. Son étude sur la nature de la chaleur et sa découverte de la relation avec le travail mécanique l'ont conduit à la théorie de la conservation de l'énergie.

Le joule [J] unité de quantité d'énergie, de chaleur, de travail. Unité dérivée du système SI. C'est le travail d'une force d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force :

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times \text{m} = 1 (\text{kg} \cdot \text{m}^2) / \text{s}^2$$

Le joule s'exprime en (kilogramme x mètre carré) par seconde au carré.

L'effet Joule (Electricité) - Dans un circuit électrique, « l'effet Joule » résulte du fait que les électrons, en circulant dans un matériau conducteur, font vibrer les atomes qui le constituent. Lorsque les atomes vibrent, la température augmente.

L'énergie thermique (quantité de chaleur) produite s'exprime par la loi de Joule :

$$E = R \times i^2 \times t \text{ [J]}$$

Ainsi, la quantité de chaleur dégagée E [J] est fonction de 3 facteurs :

- La résistance R [Ω] du matériau conducteur d'électricité,

- Du carré de l'intensité i [A] du courant électrique qui circule dans le matériau,
- Le temps (t) pendant lequel le courant circule dans le matériau.

Lois de Joule (Thermodynamique)

1^{ère} Loi de Joule (Joule - Gay Lussac)

« L'énergie interne¹ d'un gaz ne dépend que de la température. »

2^{ème} Loi de Joule (Joule - Thomson)

« L'enthalpie d'un gaz ne dépend ne dépend que de la température »

1. Voir : MAYER

Théodore Von KARMANN

(1881-1963)

Ingénieur et physicien hongrois et américain spécialisé en aéronautique. Il a mis en évidence « l'allée double des tourbillons alternés » à l'aide du « tunnel hydrodynamique extra plat. »

Tourbillons alternés (Allée double des tourbillons alternés). Ils se manifestent dans les sillages d'obstacles. Dans les turbines, en particulier, on les observe surtout aux bords de fuite des aubes, des directrices et des avant-directrices. Ils sont sensibles au sigma. Ils sont constitués de lâchers de tourbillons alternés, chacun tournant dans le sens opposé au précédent, générant ainsi des sollicitations alternées aux bords de fuite qui secouent le profil à des fréquences assez élevées mais généralement faibles en intensité

Lord KELVIN (William THOMSON)

(1824-1907)

Physicien britannique d'origine irlandaise reconnu pour ses travaux en thermodynamique.

Il a découvert en 1852 le refroidissement provoqué par la détente des gaz D (effet *Joule-Thomson*). Ses travaux de thermodynamique ont permis l'introduction de la température thermodynamique (ou absolue). En électrostatique, il a imaginé le galvanomètre à aimant mobile et donné la théorie des circuits oscillants ; en géophysique, ses études sur les marées terrestres sont restées fondamentales. En 1876, il a inventé le premier dispositif d'intégration permettant d'arriver à une solution mécanique des équations différentielles.

Echelle de Température thermodynamique. Le kelvin [K], est l'unité de base SI de température thermodynamique. Jusqu'au 20 mai 2019, le kelvin était défini comme la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (H₂O), une variation de température d'1 [K] étant équivalente à une variation d'1 [°C]. La nouvelle définition a pour objectif de respecter cette valeur, mais en l'ancrant sur une valeur fixée de la constante de Boltzmann. À la différence du

degré Celsius, le kelvin est une mesure absolue de la température qui a été introduite grâce au troisième principe de la thermodynamique. La température de 0 [K] est égale à $-273,15$ [°C] et correspond au zéro absolu (le point triple de l'eau est donc à la température 0,01 °C). Le kelvin, n'étant pas une mesure relative, n'est jamais précédé du mot « degré » ni du symbole « ° », contrairement aux degrés Celsius ou Fahrenheit.

Gustav KIRCHOFF

(1824-1887)

Physicien allemand. Il apporta de nombreuses contributions à l'électrodynamique, à la physique du rayonnement et à la théorie mathématique de l'élasticité.

Les **lois de Kirchhoff** expriment la conservation de l'énergie et de la charge dans un circuit électrique. Une autre loi vise le rayonnement. Elles portent le nom du physicien allemand qui les a établies en 1845.

Antoine Laurent LAVOISIER

Ci-devant de Lavoisier

(1743- guillotiné en 1794)

Chimiste, philosophe et économiste français, souvent présenté comme le père de la chimie moderne.

Lavoisier a révolutionné la chimie en identifiant l'azote et l'oxygène comme des composants de l'air. En effet, dans ses ouvrages, il démontrait que l'air responsable de la combustion était aussi une source d'acidité. Il démontrait aussi le rôle de l'oxygène dans la respiration végétale et animale, ainsi que son rôle dans la formation de la rouille.

Il découvrit également un gaz inflammable qu'il baptisa hydrogène (du grec « formeur d'eau », car il réagissait avec l'oxygène pour former de l'eau). Ainsi, Lavoisier fut le premier à contredire l'antique théorie des quatre éléments que sont l'eau, l'air, le feu et la terre.

Les expériences de Lavoisier furent les premières expériences chimiques à être exécutées de façon répétitive. Avec d'autres chimistes, Lavoisier conçut une nomenclature chimique où chaque élément chimique était répertorié. Ce système est encore utilisé aujourd'hui. Son *Traité élémentaire de chimie* (1789) est considéré comme le premier manuel chimique moderne, et présentait les nouvelles théories de chimie.

« *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* »

Citation apocryphe d'Antoine Lavoisier sur la conservation des masses lors du changement d'état de la matière

« *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* »

Edme MARIOTTE

(1620-1684)

Physicien né à Dijon et mort à Paris. Prieur de Saint Martin-sous-Beaune, il est le fondateur, en France, de la physique expérimentale. Comme Boyle, il énonça la loi de la compressibilité des gaz. Mariotte s'intéressa à l'hydrostatique et à l'hydrodynamique. Pour ses expériences, il se servit en particulier d'un flacon connu depuis sous le nom de « Vase de Mariotte »

Loi des gaz parfaits (dite aussi loi de Boyle-Mariotte et aussi loi des gaz parfaits). D'une façon plus générale, on qualifie de **GAZ PARFAIT** (*lire gaz parfait*) un gaz qui vérifie simultanément les lois : de Boyle-Mariotte, d'Avogadro, de Charles, de Gay-Lussac et de Dalton. (voir Avogadro, Boyle, Charles, Gay-Lussac et Dalton).

Un gaz est dit « Gaz parfait » lorsque la relation qui suit est vérifiée au cours de son évolution :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

avec :

V [m³] : volume occupé par le gaz**N [Nombre]** : nombre de moles du gaz considéré**R [J / (K × mol)]** : constante des gaz parfaits.

R = 8,3144621 [J / (K × mol)]

T [K] : température du gaz

Vase de Mariotte (ou bouteille de, ou flacon ...) Le débit d'écoulement d'un liquide d'un vase est fonction de la hauteur du liquide au-dessus du trou. Le vase de Mariotte est un dispositif qui permet d'obtenir un débit constant.

Julius Robert MAYER

(1814-1878)

Fils d'un apothicaire, il naquit à Heilbronn (Allemagne) et étudia la médecine à l'université de Tübingen. En 1840 il embarqua comme médecin sur un navire à destination de Djakarta. N'ayant pas grand-chose à faire sur le bateau, des réflexions semi-philosophiques le conduisirent à formuler le principe de la conservation de l'énergie !

Principe de Mayer (dit 1er principe de la thermodynamique). Le principe est relatif à l'équivalence entre la quantité de chaleur reçue [Q] et le travail fourni au cours d'une transformation fermée : ***Dans toute transformation thermodynamique¹, la somme algébrique des quantités de chaleur [Q] et le travail [W] reçu par le système considéré ne dépend que de l'état initial et de l'état final.*** L'énoncé trivial et célèbre du 1er principe est : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »

Second principe de la thermodynamique : Voir Carnot.

Energie interne. En vertu du principe de Mayer, à chaque état d'un système, on peut faire correspondre une fonction d'état appelée : énergie interne. Cette fonction n'est connue qu'à une constante près :

$$\Delta U = W + Q$$

Pour un cycle fermé, le système revient à l'état initial et l'on a :

$$\Delta U = 0 \text{ soit } W + Q = 0$$

Enthalpie. L'enthalpie [H] comme l'énergie interne est une fonction d'état dont la valeur n'est connue qu'à une constante près. Anciennement dénommée chaleur totale. Par définition, la fonction enthalpie s'exprime par :

$$H = U + P \cdot V$$

Dans le cas de la vapeur d'eau, on admet par convention que l'enthalpie est nulle à 0,01 °C. La variation d'enthalpie au cours d'une transformation ne dépend que de l'état initial et de l'état final.

L'enthalpie [H] et l'énergie interne [U] repré-

sentent des quantités d'énergie et s'expriment en Joules [J] ou en kilojoules [kJ].

L'enthalpie [H] et l'énergie interne [U] représentent des quantités d'énergie et s'expriment en Joules [J] ou en kilojoules [kJ].

Relation de Mayer. Pour un gaz parfait :

$$C_p - C_v = R$$

C_p et C_v étant respectivement les chaleurs massiques à pression constante et à volume constant. R constante des gaz parfaits (R = 8,32 [J × K⁻¹ × mole⁻¹])

Transformation adiabatique d'un gaz parfait.

Pour un gaz parfait, dans une transformation adiabatique (dQ = 0 par définition) si on pose : R = C_p / C_v on démontre que :

$$P \cdot V = C^{ste}$$

1. On dit qu'un système subit une transformation thermodynamique lorsqu'il passe d'un état initial [A] à un état final [B] en n'échangeant que du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur.

Joseph Bertrand McADAMS

(1920-1981)

Physicien anglais des accélérateurs connu pour son travail au CERN. Le CERN¹ est aujourd'hui l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire.

Transferts thermiques. Dans un échangeur, pour les transferts thermiques, le coefficient d'échange thermique global U dépend de la répartition des résistances thermiques dans l'échangeur.

Si les surfaces d'échange sont égales pour les deux fluides :

$$1/U = 1/h_o + e/\lambda + 1/h_f$$

Les valeurs des coefficients de convection h_c et h_f sont fonction des propriétés thermophysiques des fluides et des configurations d'échange, les régimes convectifs dépendant fortement de la vitesse d'écoulement. Elles peuvent être obtenues à partir de corrélations donnant la valeur du nombre de Nusselt :

$$Nu = (h \cdot dh) / \lambda$$

Où h est le coefficient d'échange superficiel ($W/m^2 K$)

dh est une dimension caractéristique du pro-

blème (m) (épaisseur de la couche limite thermique par exemple)

λ est la conductivité thermique du fluide considéré ($W/m \cdot K$)

Le nombre de Nusselt (Nu) est un nombre adimensionnel utilisé en transfert thermique pour caractériser l'efficacité du transfert de chaleur par convection par rapport au transfert de chaleur par conduction dans un milieu fluide.

Si Nu est très grand, le transfert convectif est dominant ce qui indique un transfert convectif très efficace entre le fluide et le solide.

1. À l'origine, l'acronyme correspondait à « Conseil européen pour la recherche nucléaire », un organe provisoire institué en 1952, qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche en physique.

André MISSENARD

(1901-1989)

Polytechnicien, scientifique et entrepreneur, il fut à l'origine du COSTIC (Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques). Son nom reste à ce jour connu et respecté par toute la profession.

Thermomètre boule. Les recherches d'André Missenard portèrent sur les techniques de chauffage, de ventilation, le conditionnement d'air puis sur la réflexion humaniste entre l'homme et le climat. Il a travaillé sur les notions de confort dans l'habitat notamment sur la sensation de chaleur, température résultante, soufflage à grande vitesse, chauffage par le sol... et aussi l'énergie solaire.

On lui doit le « thermomètre boule » qui donne la valeur de la température résultante.

Richard MOLLIER

(1863-1935)

Physicien et ingénieur allemand. Il a donné son nom au diagramme de MOLLIER.

Diagramme de Mollier. Le diagramme de Mollier est un outil visuel utilisé en thermodynamique pour représenter le comportement d'un fluide dans son cycle de chauffage et de refroidissement. Il permet de visualiser l'état d'un fluide connaissant deux de ses propriétés. C'est un outil utilisé pour le dimensionnement des installations de CVC.

**Joseph-Michel (1740-1810) et Jacques-Etienne
(1745-1790) MONTGOLFIER**

Les frères Montgolfier, sont des industriels français de la papeterie, inventeurs de la montgolfière, ballon à air chaud (aérostat) grâce auquel a été réalisé en 1783 le premier vol d'un être humain.

Formule de Montgolfier pour les conduits de fumée.

Pour déterminer la section d'un conduit de fumée on a souvent proposé des formules telles que :

$\varpi = P / (k \cdot h^{1/3})$ avec :

ϖ section du conduit de fumée en [m²]

P puissance du générateur en [kW]

h hauteur du conduit de fumée en [m]

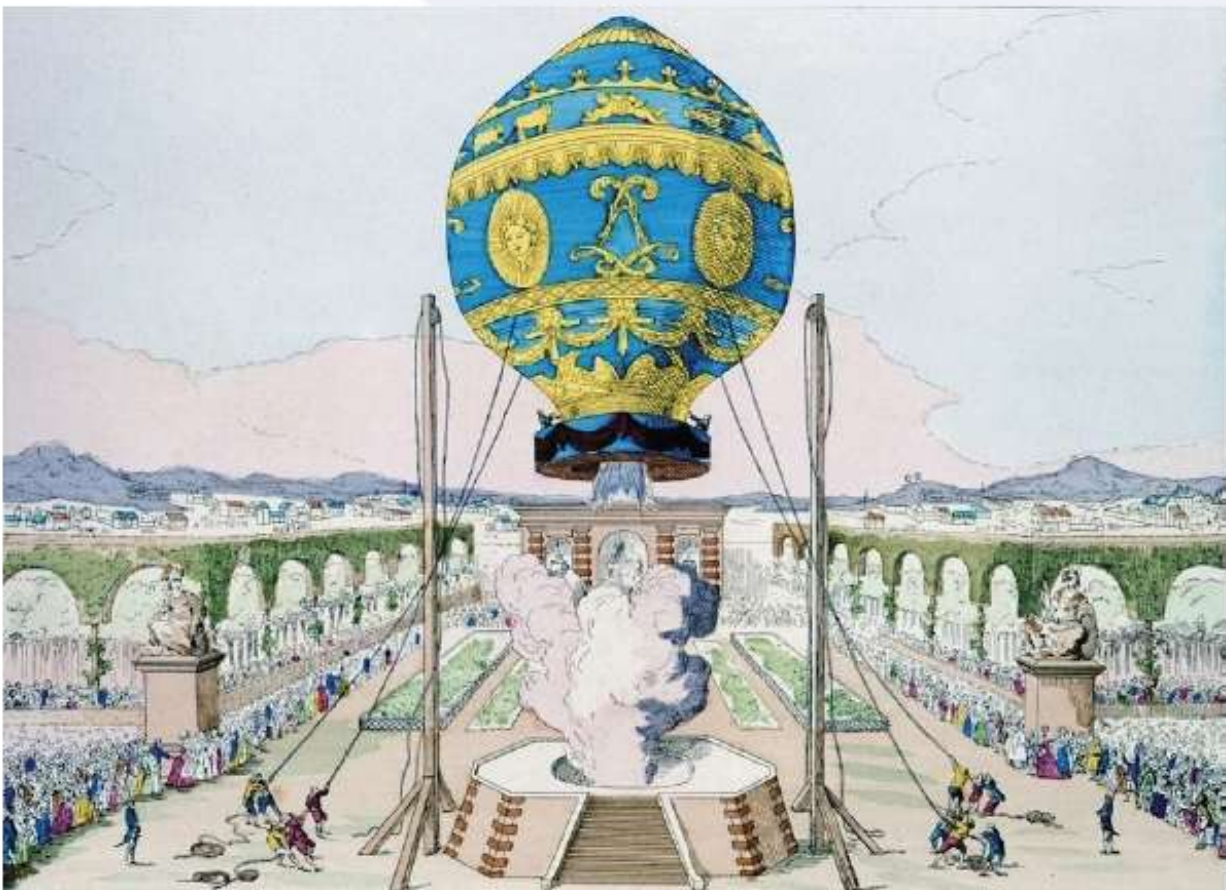
k coefficient par exemple : 400 pour un foyer en dépression, 1200 pour un foyer pressurisé.

Bélier hydraulique ou Pompe de Montgolfier.

Imaginé par Joseph de Montgolfier, en 1792. Ce mécanisme fonctionne de façon autonome, sans aucune autre énergie que celle de l'eau captée. Pour que le bélier fonctionne, 2 conditions sont requises : une alimentation en eau au débit permanent, égal ou supérieur à celui du bélier (source, ruisseau, rivière,

lac, canal) et l'installation du mécanisme en contrebas du captage.

Cette notion est très importante, car c'est cette dénivellation qui produit l'énergie motrice (pression de l'eau et vitesse) et conditionne la hauteur utile théorique de refoulement (jusqu'à 10 fois la dénivellation).



André MORIZET

(1861-1931)

Notaire, homme politique fondateur du parti communiste, sénateur et maire de Boulogne-Billancourt

Loi Morizet (20 avril 1932). C'est la première loi qui intègre la notion de «pollution atmosphérique». Elle vise à supprimer les fumées provenant d'industries et contenant des poussières, des gaz toxiques ou corrosifs qui risquent d'incommoder le voisinage, de polluer l'atmosphère ou de nuire à la santé. On y trouve :

« Interdire aux usines de cracher leurs fumées aux heures où les enfants des ouvriers allaient à l'école ou en sortaient. »



John NEPER (Jean NAPIER)

(1550-1617)

Théologien, physicien, astronome et mathématicien écossais.

Le logarithme népérien, ou logarithme naturel, ou encore jusqu'au 20^{ème} siècle logarithme hyperbolique, transforme, comme les autres fonctions logarithmes, les produits en sommes. L'utilisation de telles fonctions permet de faciliter les calculs comprenant de nombreuses multiplications, divisions et élévations à des puissances rationnelles. Il est souvent noté $\ln()$, remplaçant l'ancienne désignation par $\log()$.

La règle à calcul utilise des échelles logarithmiques. Il existe aussi des tables de logarithmes comme celles de C. Bouvart et A. Ratinet (ci-contre).

Note : Camille Bouvart (1837-1918), agrégé de sciences mathématiques et physiques et Alfred Ratinet (1921-1980), licencié ès sciences mathématiques et physiques. La première édition des tables remonte à 1905 et les tables étaient encore éditées en 1980 et autorisées pour les concours aux Grandes écoles.



Isaac NEWTON

(1642-1727)

Mathématicien, physicien, philosophe, alchimiste, astronome et théologien anglais, puis britannique. Figure emblématique des sciences, il est surtout reconnu pour avoir fondé la mécanique classique, pour sa théorie de la gravitation universelle et la création du calcul infinitésimal.

La pomme de Newton et... la loi universelle de la gravitation. On connaît tous l'histoire de la pomme de Newton et la gravitation universelle. Un soir d'été dans un verger, Newton jeune observe la lune et voit une pomme tomber d'un pommier. Aussitôt il a l'idée de la gravitation universelle !

La loi universelle de la gravitation ou loi de l'attraction universelle, est la loi qui décrit la gravitation comme une force responsable de la chute des corps et du mouvement des corps célestes, et de façon générale, de l'attraction entre des corps ayant une masse, comme par exemple les planètes.

Le newton [symbole : N] est l'unité (Unité dérivée du Système SI) de mesure de la force nommée ainsi en l'honneur d'Isaac Newton pour ses travaux en mécanique classique. Le newton équivaut à un **kilogramme mètre par seconde carrée** [1 kg.m.s⁻²]. C'est-à-dire qu'un newton est la force colinéaire au mouvement qui, appliquée pendant une seconde à un objet d'un kilogramme, est capable d'ajouter (ou de retrancher) un mètre par seconde à sa vitesse.

On a également utilisé le kilogramme-force [kgf], force exercée par une masse de 1 kg dans le champ de pesanteur terrestre (au niveau de la mer), et qui vaut donc environ 9,81 [N], ainsi que la sthène qui vaut 1[kN]. L'aéronautique et l'astronautique ont fait un grand usage d'un multiple du kilogramme-force : la tonne de poussée. Là où l'on utilisait le kgf, on utilise maintenant le décanewton (daN) : 1 [daN]= 10 [N]= 1,02 [kgf]

Loi universelle de la gravitation

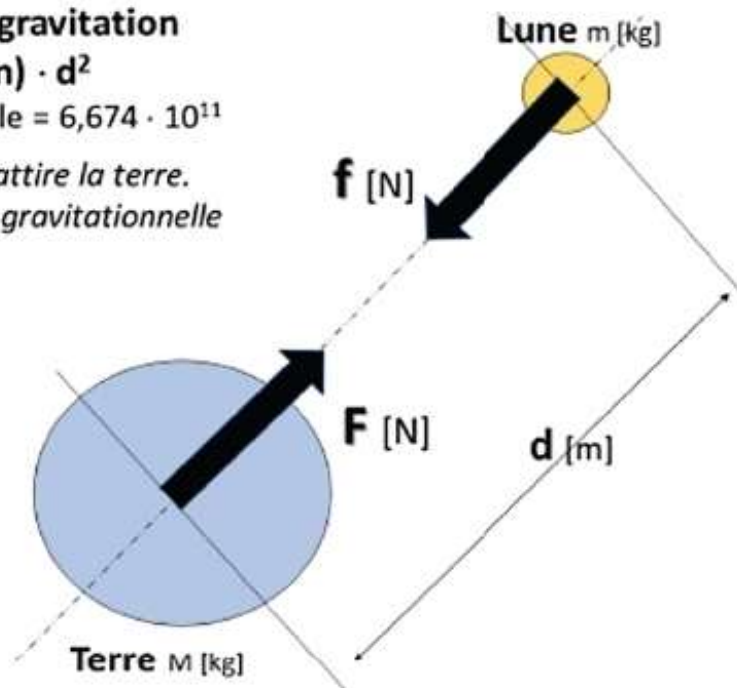
$$F = f = (G \cdot M \cdot m) \cdot d^{-2}$$

G : constante gravitationnelle = 6,674 · 10¹¹

La terre attire la lune et la lune attire la terre. Il apparait une force d'interaction gravitationnelle



Pesanteur : la pomme de Newton. F [N] ; m [kg] ; g = 9,81 [m · s⁻²]



Ernst Kraft Wilhelm NUSSELT

(1882-1957)

Physicien allemand. Pionnier dans l'étude de transfert de la chaleur par convection. Son nom reste attaché au nombre adimensionnel auquel son nom a été donné.

Nombre de Nusselt. Nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Il met en rapport le transfert par convection par rapport au transfert par conduction. Il est d'autant plus élevé que la convection prédomine sur la conduction. Déterminer le nombre de Nusselt permet de calculer le coefficient de convection thermique.

Le nombre de Nusselt local est défini de la manière suivante :

$Nu = (h \cdot L_c) / \lambda$ avec :

h [$W \times m^{-2} \times K^{-1}$] : Coefficient de transfert

thermique en un point de la surface,

L_c [m] : longueur caractéristique,

λ [$W \times m^{-1} \times K^{-1}$] : Conductivité thermique du fluide

Georg Simon OHM

(1789-1854)

Physicien allemand, professeur d'université. Il débuta ses études sur la cellule électrochimique inventée par Alessandro Volta.

L'unité ohm et une loi portent son nom.

L'Ohm [Ω] Unité de résistance électrique (système SI). La résistance électrique s'exprime en ohm.

$$1 \Omega = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$$

$$\text{Dimensions : } L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$$

La loi d'Ohm est une loi physique expérimentale qui lie l'intensité d'un courant électrique traversant un dipôle électrique à la tension à ses bornes. Cette loi permet de déterminer la valeur d'une résistance.

Lorsque l'on soumet une différence de potentiel U [V] continue à un objet, on provoque une circulation de charges électriques quantifiée par l'intensité du courant I [A]. Si cette intensité n'est pas nulle, la résistance R est alors le rapport entre la différence de potentiel et l'intensité :

$$R = U / I$$

Si le courant n'est pas continu CC (courant alternatif CA), on peut toutefois appliquer cette loi en considérant les valeurs efficaces¹. Résistance d'un fil homogène. Pour un conducteur la résistance R [W] est :

Résistance d'un fil homogène. Pour un conducteur la résistance R [Ω] est :

$$R = (\rho \cdot l) / s$$

¹ La valeur efficace dite RMS (Root Mean Square) d'une tension alternative représente son potentiel de puissance moyenne. Ce qui signifie qu'une tension AC de 220 V produit dans une résistance la même puissance qu'une tension DC de 220 V.

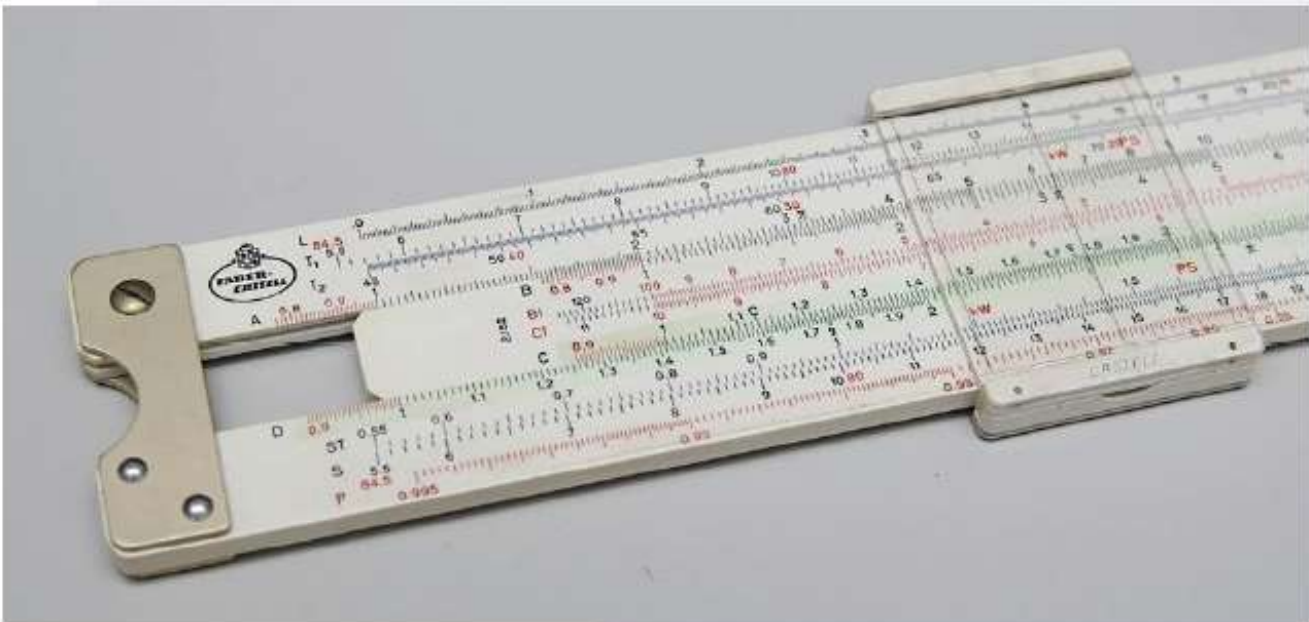
William OUGHTRED

(1574-1660)

Pasteur anglican, mathématicien et théologien.

La règle à calcul est basée sur les propriétés des logarithmes. Vers 1622, William OUGHTRED, pasteur anglican, perfectionna une invention de Edmund GUNTER qui avait développé un appareil de calcul (vers 1620) utilisant une échelle logarithmique qui permettait de multiplier ou de diviser. C'est à John NAPIER (ou NEPER) que l'on doit le concept de logarithme (vers 1617) :

$$\log(a*b) = \log(a) + \log(b)$$



La règle à calcul a d'abord été utilisée presque uniquement en Angleterre sous des formes spécifiques à chacun de ses usages, puis transformée sous l'impulsion de James WATT pour les besoins de ses usines vers 1780. Ce n'est qu'en 1815 qu'elle a vraiment pénétré en France.

A cette époque et jusqu'à la généralisation du calcul informatique, il n'existait pour les calculs mécaniques guère que la « Pascaline » de Blaise PASCAL (voir Pascal) permettant de faire des additions et des soustractions (?). Dans la pratique et jusqu'à la généralisation de l'usage de l'ordinateur, le climaticien ne disposait guère que de la règle à calcul pour dimensionner ses installations de génie climatique.¹

La disparition de la règle à calcul est riche d'enseignements sur l'évolution des instru-

ments de calcul. La révolution amenée par les méthodes et machines numériques par rapport aux instruments mécaniques et analogiques est une des caractéristiques de la fin de l'ère industrielle.

Tableurs. Pour les calculs en général et en particulier pour dimensionner les installations du génie climatique, l'utilisation de tableurs est maintenant de règle. Le tableur (par exemple Excel de Microsoft) permet d'effectuer des calculs de façon rapide et précise.

Les feuilles de calcul informatisées ont été inventées par Pardo et Landau qui en ont déposé le brevet en 1970.

Nota : le livre de Marc THOMAS (La règle à calcul. La longue histoire d'un instrument oublié) raconte une histoire qui s'étend sur 350 ans : l'histoire d'un petit instrument de calcul, inventé dans les années 1620, qui ne sera détrôné que par l'apparition des calculatrices électroniques dans les années 1970.

¹ A cette époque le calcul des déperditions de base se faisait à la main. Nota : à l'Ecole de thermique, il était demandé des résultats à la calorie près !

Blaise PASCAL

(1623-1662)

mathématicien (Triangle de Pascal), physicien (Principe de Pascal), inventeur (Machine d'arithmétique ou roue Pascaline), philosophe, moraliste, théologien...

Eduqué par son père, il fut un enfant précoce : à 12 ans il démontra seul que la somme des angles d'un triangle est égale à 180° .

Le pascal [Pa], unité de pression (ou de contrainte). Conformément aux règles du Système international des unités (SI), le nom de l'unité commence par une minuscule (« pascal ») mais comme il provient d'un nom propre, le symbole commence par une majuscule (« Pa »).

Le pascal est la pression uniforme qui, agissant sur une surface plane de $1 \text{ [m}^2\text{]}$, exerce perpendiculairement à cette surface une force de 1 [N] (newton) : $\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2$.

Autres unités de pression :

- **atmosphère normale [atm]**. L'atmosphère normale, unité de pression hors SI, égale à 101.325 Pa (10ème conférence des poids et mesures). Elle correspond à la pression de 760 mm Hg , à 0°C sous une accélération de la pesanteur à Paris de $g = 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- **atmosphère technique [at]**. L'atmosphère technique est définie comme la pression exercée par une colonne d'eau de 10 mètres ($1 \text{ at} = 98\,066.5 \text{ Pa}$). L'at est utilisée en plongée sous-marine, en particulier.
- **bar [bar]**. Le bar est une unité de mesure de la pression équivalente à $100\,000 \text{ [Pa]}$. Le bar présente l'intérêt d'être voisin de l'atmosphère. Hors du Système international, cette unité dérive de la barye.
- **barye [ba]**. Unité de pression du système CGS : c'est la pression exercée par une force égale à 1 dyne sur une surface de 1 cm^2 . $1 \text{ [bar]} = 0.1 \text{ [Pa]}$.
- **mmHg**. Le millimètre de mercure, $[\text{mm Hg}]$ est une unité de pression qui ne fait pas partie du Système international, mais dont l'usage est reconnu par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) comme unité hors SI. Le millimètre de mercure vaut environ $1/760$ de l'atmosphère et 133.322 pascals .
- **cm H₂O**. Le centimètre d'eau ou $[\text{cm H}_2\text{O}]$ est une unité de pression utilisée en médecine (la tension). $1 \text{ [cm H}_2\text{O]} = 98.0638 \text{ [Pa]}$
- **pièze**. Le pièze $[\text{pz}]$ est une ancienne unité

du système mètre-tonne-seconde (MTS).

Elle correspond à la pression uniforme qui, sur 1 mètre carré , produit un effort de 1 sthène ($1 \text{ [sn]} = 1 \text{ [kN]}$). $1 \text{ [pz]} = 0.01 \text{ [bar]}$

• **psi**. La livre-force par pouce carré (pound-force per square inch, $[\text{psi}]$ ou $[\text{lbf/in}^2]$, est la pression anglo-saxonne. $1 \text{ [psi]} = 6\,894.16 \text{ [Pa]}$.

• **torr**. Le torr $[\text{Torr}]$ ou millimètre de mercure $[\text{mm Hg}]$ est une unité de pression qui ne fait pas partie du Système SI $1 \text{ [Torr]} = 1 \text{ [mm Hg]} = 101\,325/760 \text{ [Pa]}$. Torr vient de Torricelli.

Principe de Pascal. Dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme, la pression est la même en tout point du liquide situé à la même profondeur. Le principe de Pascal permet l'énoncé du **théorème de l'hydrostatique** :

Dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme, la différence de pressions entre 2 points est égale au poids de la colonne de liquide ayant pour section l'unité de surface et pour hauteur la différence de niveau des 2 points. Toute pression exercée sur un liquide se transmet par lui intégralement et dans toutes les directions.

Le principe de Pascal est appelé aussi loi de Pascal, théorème de Pascal, ou principe de transmission de pression de fluide.

Pression atmosphérique, les expériences de Pascal. En 1647, Blaise Pascal suggère d'élever le dispositif barométrique de Torricelli au sommet du Puy-de-Dôme afin d'éprouver l'hypothèse de la « pesanteur de la masse de l'air », forme primitive de ce qui deviendra la pression atmosphérique. Cette expérience réalisée en 1648, s'inscrit sur fond de polémique autour de l'existence du vide et va faire l'objet d'interprétations variées. Ainsi, l'hypothèse de la pesanteur de la masse de l'air comme cause des variations observées au cours de l'ascension du Puy-de-Dôme est loin de faire l'unanimité parmi les savants du XVII^e siècle. À Florence, en 1643, le savant Torricelli fait des expériences avec du mercure et met en évidence que « l'air a un poids ». Il réalise le premier baromètre à mercure, instrument qui mesure la pression de l'air.

- À Paris, la même année, Pascal reprend les expériences de Torricelli en ayant l'idée de mesurer la « hauteur du mercure » en altitude. Il n'en tire pas de conclusion satisfaisante.
- En effectuant une série de mesures au Puy-de-Dôme, le beau-frère de Pascal, Périers, remarque, lui, que la pression diminue avec l'altitude.
- L'Académie des sciences baptise le tube

de Torricelli « baromètre ». En hommage à Pascal, on donne par la suite son nom à l'unité de mesure de la pression, le « pascal ».

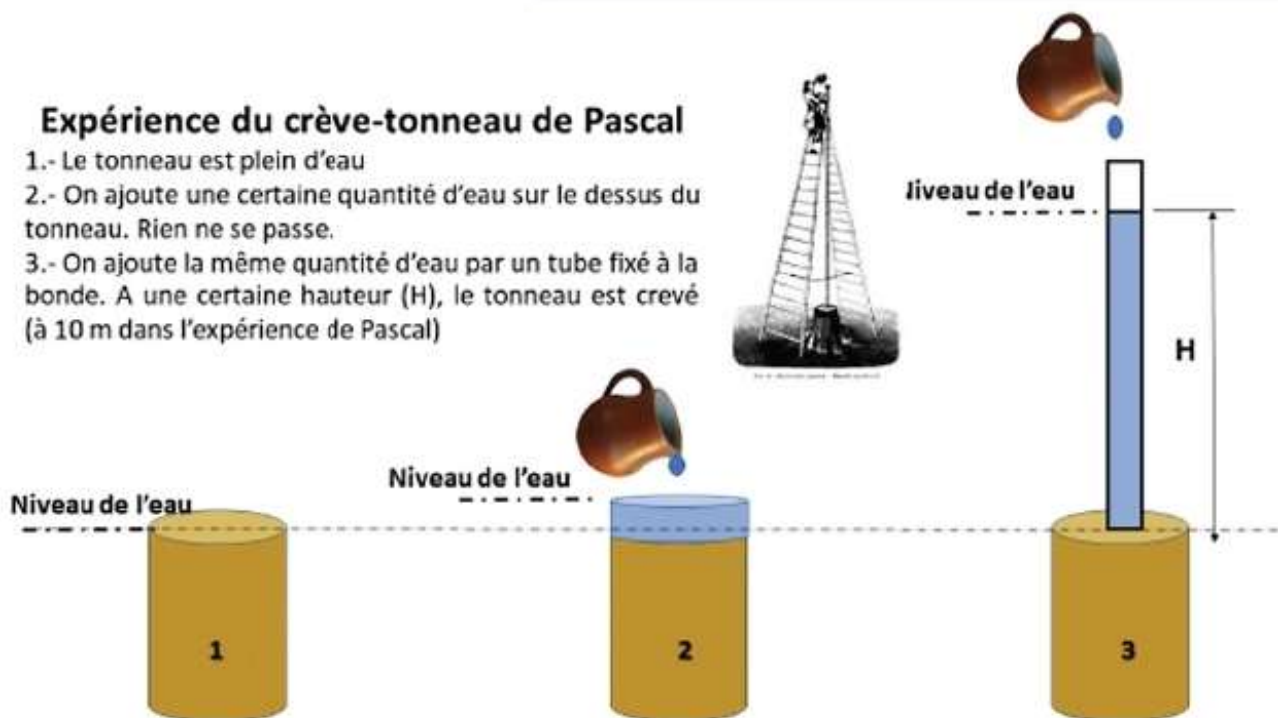
La **Pascaline**, initialement dénommée **machine d'arithmétique puis roue Pascaline**, est une calculatrice mécanique inventée par Blaise Pascal et considérée comme la première machine à calculer.



L'**hexagramme de Pascal**, ou hexagramme mystique, est une figure géométrique illustrant le théorème de Pascal. Il représente un hexagone quelconque inscrit dans une conique. Ce théorème démontre que les trois intersections des côtés opposés sont alignées.

Expérience du crève-tonneau de Pascal

- 1.- Le tonneau est plein d'eau
- 2.- On ajoute une certaine quantité d'eau sur le dessus du tonneau. Rien ne se passe.
- 3.- On ajoute la même quantité d'eau par un tube fixé à la bonde. A une certaine hauteur (H), le tonneau est crevé (à 10 m dans l'expérience de Pascal)



Jean-Charles PELTIER

(1785-1845)

Physicien français, fils d'un sabotier et d'abord horloger. Découvre (vers 1834) l'effet thermoélectrique selon lequel le courant, à travers la jonction de deux matériaux, provoque, dans cette jonction, le dégagement ou l'absorption d'une quantité de chaleur qui, par unité de temps, est proportionnelle au courant.

Effet PELTIER. Phénomène de transfert, de déplacement d'énergie (de chaleur) lorsqu'on soumet deux types de conducteurs, bons et mauvais conducteurs électriques à une tension de type continu. Le sens du déplacement d'énergie dépendant du sens de circulation du courant, c'est donc un système réversible.

Dans un transducteur¹ à thermocouples, deux métaux sont en contact et leurs jonctions sont à des températures différentes. Une différence de potentiel peut être relevée entre deux points du circuit. Elle est fonction de ΔT entre les 2 jonctions, $V = a * \Delta T$; a, coefficient de Seebeck.

L'effet Peltier est l'inverse de l'effet Seebeck découvert un petit peu plus tôt vers 1822. Lorsque l'on raccorde 2 fils de métaux différents et que l'on chauffe l'une des extrémités, un courant (déplacement d'électrons) continu est généré dans le circuit. De nos jours, compte tenu des performances des semi-conducteurs, l'effet Peltier est une vraie alternative pour refroidir, réfrigérer des

installations de très petite puissance. Il n'est pas de nature à remplacer les systèmes à compression beaucoup plus performants.

Caléfaction de l'eau. Peltier détermina expérimentalement la température de l'eau en caléfaction.

Nota : La caléfaction est un phénomène d'isolation thermique d'un liquide par rapport à une surface chauffante ayant atteint une température seuil T_s dite température de Leidenfrost, nettement supérieure à la température d'ébullition du liquide T_e . C'est le phénomène (dit effet de Leidenfrost²) qui met en caléfaction une goutte d'un liquide sur une plaque chaude. Le principe étant qu'une fine pellicule de vapeur se crée à partir du liquide et isole de la chaleur.

1. Transducteur : dispositif assurant une conversion ou un transfert de signaux et dans lequel un signal au moins est de nature électrique.

2. Johann Gottlob Leidenfrost (1715 -1794), médecin et théologien allemand.

Henri PITOT

(1695-1771)

Inventeur, ingénieur, astronome. On lui doit le « tube de Pitot » (1732) pour la mesure de la vitesse relative des fluides utilisés en mouvement et des écoulements, la vitesse des bateaux ou des avions...

Tube de Pitot. Dénommé Speedomètre (indicateur de vitesse) ou Pitot sur les bateaux et Tube de Pitot ou sonde sur les avions.

Dans un fluide en mouvement, le tube de Pitot mesure la différence entre la pression totale (tube B) et la pression statique (tube A). Cette différence est égale à $v^2/2g$

Le tube de Pitot a été perfectionné par Henri Darcy. Voir Prandtl : Antenne ou tube de Prandtl

Gaston PLANTE

(1834-1889)

Physicien, paléontologue, inventeur, il est à l'origine de la batterie électrique.

Accumulateur plomb/acide. La première batterie électrique rechargeable se compose d'un rouleau spiralé de deux feuilles de plomb séparées par un tissu en lin, plongé dans un récipient en verre contenant une solution d'acide sulfurique. L'année suivante, il présente une batterie au plomb de neuf cellules à l'Académie des sciences. En 1881, Camille Alphonse Faure développera un modèle plus efficace et plus fiable qui connaîtra un grand succès dans les premières voitures électriques. Ce type de batterie permettra en 1899 à une voiture électrique, la « Jamais contente », de franchir la vitesse de 100 km/h. Par la suite, ce type de batterie est devenu le premier type de batterie rechargeable commercialisé. Beaucoup des batteries de nos voitures actuelles fonctionnent toujours selon le même principe.



la « Jamais contente »

Ludwig PRANDTL

(1875-1953)

Ingénieur et physicien allemand. Il a apporté d'importantes contributions à la mécanique des fluides (notamment la théorie de la couche limite) et à la théorie de la résistance des solides.

Nombre de Prandtl. Le nombre de Prandtl (Pr) est un nombre sans dimension. C'est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique).

$$Pr = \nu / a$$

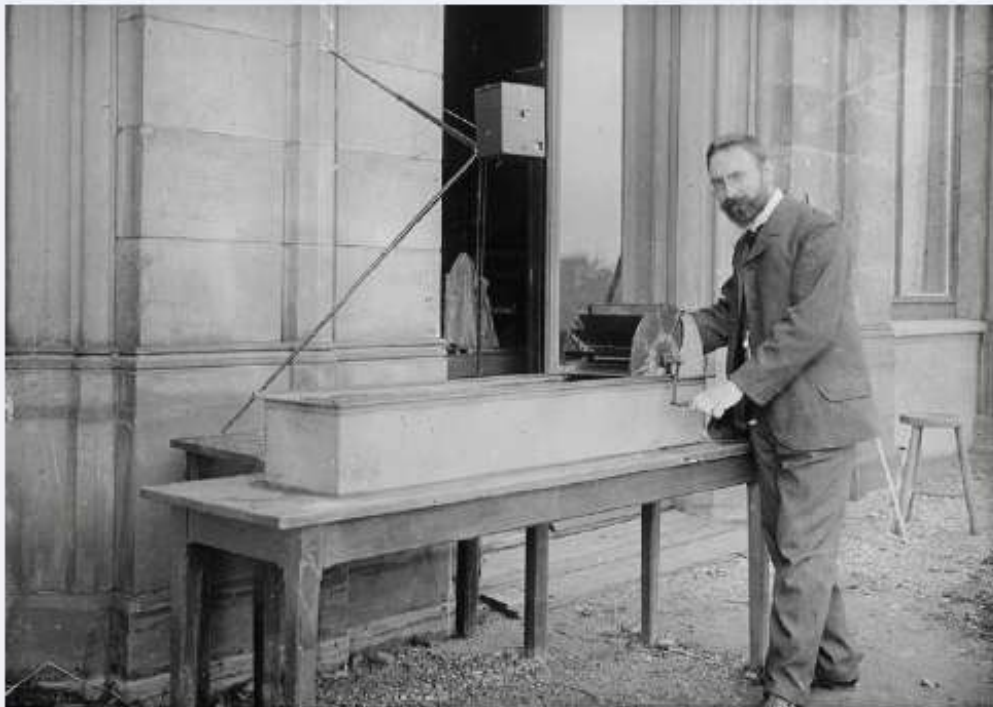
Avec : ν (viscosité cinématique) et a (diffusivité thermique) en $[m^2/s]$

Le nombre adimensionnel de Prandtl (Pr) caractérise la relation entre la diffusion de quantité de mouvement (viscosité cinématique) et la diffusion thermique (diffusivité thermique) dans un fluide.

- Un nombre de Prandtl < 1 signifie que la diffusion thermique est plus efficace que la diffusion de quantité de mouvement. Cela est typique pour les métaux liquides où la conductivité thermique est très importante.
- Un nombre de Prandtl > 1 indique que la diffusion de quantité de mouvement est plus efficace que la diffusion thermique, ce qui est généralement le cas pour les huiles et autres liquides visqueux.

- Pour de nombreux gaz à température et pression ambiantes, le nombre de Prandtl est proche de 1, ce qui signifie que la diffusion de chaleur et la diffusion de quantité de mouvement se produisent de façon comparable.

Antenne (ou tube) de Prandtl. Dénommée également tube de Pitot statique. L'antenne de Prandtl est un tube de Pitot combiné qui permet à la fois la mesure de la pression dynamique et celle de la pression statique. Il est constitué de deux tubes coaxiaux dont les orifices sont en communication avec le fluide dont on veut mesurer la vitesse



PYTHAGORE de Samos

(580-495 avant J.C.)

Le plus connu des mathématiciens grecs de l'antiquité, qui accompagne le quotidien des écoliers avec son fameux théorème. Pourtant on ne possède aucun document historique directement rédigé de sa main. Comme la plupart des savants d'avant Platon¹, les premières bibliographies sont écrites des siècles plus tard par les Grecs.

¹ Philosophe grec 428 - 348 av. J.C.

Théorème de Pythagore :

Dans un triangle rectangle, le carré de la longueur de l'hypoténuse¹ est égal à la somme des carrés des longueurs des deux autres cotés

¹ Hypoténuse : dans un triangle rectangle, nom donné au côté opposé à l'angle droit.

Nous citons le théorème de Pythagore car il fait partie de notre culture scolaire même s'il ne concerne pas directement la thermique. Dans la vie courante, nous l'appliquons souvent pour tracer un angle droit sous la forme de : 3, 4 et 5.

Le théorème de Pythagore a souvent été dénommé théorème du pont aux ânes. Jusqu'au début du XXème siècle il était demandé aux élèves qui entraient en 6ème de connaître le théorème de Pythagore surnommé théorème du pont aux ânes. D'une façon générale, l'expression « Pont aux ânes » désigne une personne qui refuse de se rendre à l'évidence, à

l'image de l'âne qui refuse de franchir un « dos d'âne ».

Le théorème du pont aux ânes



Aide pédagogique pour retenir le théorème de Pythagore

William RANKIN

(1820 - 1872)

Ingénieur et physicien écossais

Cycle de Rankine. Les cycles organiques de Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC, en anglais) sont des variantes des cycles à vapeur à eau, qui sont utilisés lorsque la source chaude à partir de laquelle on souhaite produire de la puissance mécanique est à basse ou moyenne température. Une machine à cycle organique est une machine thermodynamique produisant de l'électricité à partir de chaleur, en utilisant un cycle thermodynamique de Rankine mettant en œuvre un composé organique¹ comme fluide de travail.

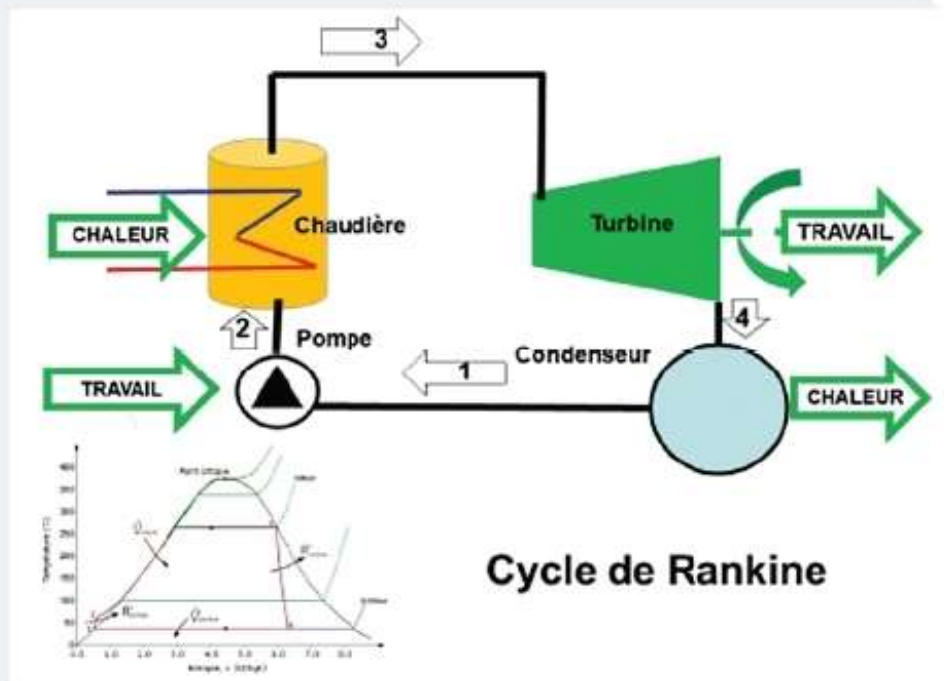
1. Composé organique : dont, en général, au moins un des éléments constitutifs est le carbone. Origine naturelle ou produit de synthèse.

Le **cycle de Rankine** est un cycle thermodynamique idéalisé d'un moteur thermique à pression constante qui convertit une partie de la chaleur en travail mécanique. Dans ce cycle, la chaleur est fournie de l'extérieur à une boucle fermée, qui utilise généralement de l'eau (en phase liquide et vapeur) comme fluide de travail. Contrairement au cycle de Brayton, le fluide de travail du **cycle de Rankine** subit

le **changement de phase** d'une phase liquide à une phase vapeur et vice versa.

Echelle de température Rankine. Le 0 de l'échelle est le zéro absolu comme dans l'échelle Kelvin et les degrés Rankine [°Ra] sont égaux aux degrés Fahrenheit.

$$1[°Ra] = 1,8 \times [K]$$



René-Antoine Ferchault de REAUMUR

(1683-1757)

Physicien et naturaliste français. Il s'intéressa beaucoup aux insectes et publia ses observations dans ses « Mémoires pour servir à l'histoire des insectes » (six tomes de 1734 à 1742), travaux pour lesquels il est considéré comme l'un des principaux fondateurs de l'entomologie (étude des insectes). Il a laissé son nom à une échelle de température largement utilisée avant le degré Celsius.

L'échelle de température Réaumur est définie à partir de la dilatation apparente de l'alcool avec un intervalle de référence entre le point de congélation de l'eau et le point d'ébullition de l'esprit de vin¹

$$1 [\text{Ré}] = 5/4 [\text{K}] \text{ ou } [^{\circ}\text{C}]$$

1. Esprit de vin : alcool éthylique obtenu par distillation de vin.



Thermomètres de Réaumur de 1730-1731

Victor REGNAULT

(1810-1878)

Chimiste, physicien et photographe français, connu pour ses mesures précises des propriétés thermiques des gaz

Formule de Regnault. Formule empirique donnant la chaleur latente de vaporisation de l'eau en fonction de la température :

$$L_v = 3335 - 2,91 T$$

avec L_v en [K] et L_v en [kJ / kg]

Cette formule est valable pour des températures allant environ de 100 à 200 °C. Cette formule est utilisée dans le fonctionnement des autoclaves.

Loi de Regnault. Etablit une relation entre la pression, la température et le volume d'un gaz parfait.

Hermann RECKNAGEL

(1859-1914)

Ingénieur allemand en génie climatique et fondateur du Recknagel. Manuel de chauffage et climatisation publié annuellement depuis 1887. Publié, en allemand, il existe une version française traduite par Jean-Louis Cauchepin.

Le RECKNAGEL. *Sous forme d'annuaire, il date de 1897. Rapidement, il est complété puis publié annuellement et devient un manuel du génie climatique. En Allemagne, continuellement mis à jour, il fait chaque année l'objet d'une nouvelle édition.*

Depuis sa première édition française en 1980, le RECKNAGEL, s'est aussi imposé en France comme manuel du génie climatique. Il est rapidement devenu une des références de base pour les professionnels. Le manuel traite des phénomènes physiques fondamentaux de la climatique puis de ses applications en chauffage, ventilation, climatisation - conditionnement d'air et froid. [.../...]

Pour cette cinquième édition française du RECKNAGEL (2013), les Editions DUNOD ont demandé de nouveau à l'AICVF de valider la traduction française. [.../...] C'est un outil indispensable au bureau d'études ; il aide à concevoir des installations qui répondent au confort des occupants avec les meilleures solutions de performance énergétique tout en satisfaisant à la réglementation thermique.

Extraits de la préface à la
5ème édition française du Recknagel
de Bertrand MONTMOREAU, président de l'AICVF.

Osborne REYNOLDS

(1842-1912)

Ingénieur et physicien irlandais. Importantes contributions à l'hydrodynamique et à la dynamique des fluides, la plus notable étant l'introduction du nombre qui porte son nom.

Nombre de Reynolds. En mécanique des fluides, nombre sans dimension caractéristique de la transition des régimes d'écoulement laminaire en régime turbulent (et réciproquement)

L'écriture habituelle du Nombre de Reynolds est :

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

V [m/s] vitesse de l'écoulement non perturbé (hors de la couche limite).

D [m] dimension caractéristique (m) (par ex la longueur d'une plaque).

ν [m²/s] viscosité cinématique.

Le nombre de Reynolds permet de classer les régimes d'écoulement (laminaire vers turbulent) en convection forcée. Il permet aussi de donner l'ordre de grandeur de l'épaisseur des couches limites et des transferts de chaleur à la paroi. C'est pour cette raison qu'on le retrouvera dans les corrélations donnant le nombre de Nusselt et donc les coefficients d'échange convectif à la paroi. En convection naturelle c'est le nombre de Rayleigh qui joue ce rôle.

Herman RIETSCHEL

(1847 - 1914)

Père du chauffage et de la ventilation. Ingénieur allemand souvent considéré comme étant le fondateur des technologies de CVC et d'un nouveau domaine de l'ingénierie du bâtiment et d'un nouveau domaine de l'ingénierie du bâtiment.

Le RIETSCHEL, manuel en quatre volumes sur le calcul et la conception des systèmes de chauffage et de ventilation est encore aujourd'hui considéré comme un ouvrage de référence. Il a mis en évidence l'interaction entre l'hygiène et la technologie pour le chauffage et la ventilation et a plaidé en faveur d'une approche globale de ceux-ci.

Il a aussi proposé l'idée d'utiliser les chaleurs perdues lors de la production d'énergie comme dans le chauffage urbain et leur récupération pour le chauffage des bâtiments

et des quartiers.

Par ailleurs, il a développé des méthodes de calcul pour des installations avec le radiateur à ailettes.

Maximilien RINGELMANN

(1861-1931)

Universitaire français membre de l'Académie d'agriculture de France. Il fut professeur d'ingénierie agricole à l'Institut national agronomique de Paris et directeur de la station d'essais de machines dès 1888.

Echelle de Ringelmann. Echelle permettant de mesurer la densité apparente ou l'opacité de la fumée. L'échelle comporte 5 niveaux de densité déduits d'une grille de lignes noires sur une surface blanche qui, si elles sont vues de loin, se fondent dans des nuances de gris connues. Des cartes étalon permettent de déterminer visuellement la densité ou l'opacité apparente d'une fumée.



Wallace Clément SABINE

1868 - 1919

Physicien américain, il a fondé le domaine de l'acoustique architecturale.

Il est considéré comme le « père de l'acoustique ».

Le coefficient α Sabine¹. Les propriétés d'absorption acoustique d'un matériau de construction d'une paroi sont caractérisées par le :

coefficient « α Sabine »

qui indique la quantité d'énergie absorbée par la paroi par rapport à la quantité d'énergie incidente.

- Si α Sabine tend vers 1 : le matériau est absorbant,
- Si α Sabine tend vers 0 : le matériau est réverbérant.

¹ Sabine. Sans rapport avec les femmes enlevées par les Romains aux Sabins.

Temps de réverbération d'un local : formule de Sabine

Le temps de réverbération d'une pièce ou d'un espace [T60] est défini comme le temps [s] nécessaire au son pour diminuer de 60 [dB].
Formule approchée de calcul : $T \approx 0,16 \times (V / A)$

- V [m³] : volume du local

• A [m²] : aire équivalente d'absorption acoustique

Le temps de réverbération détermine le confort acoustique et varie suivant la nature du local : 0,6 à 1 [s] pour une salle de classe ou de conférence, 1,4 à 1,8 pour un opéra...

Thomas Johann SEEBECK

(1770-1831)

Physicien prussien qui découvrit l'effet qui maintenant porte son nom. Ce phénomène physique est découvert en 1787 par Alessandro Volta et une deuxième fois par Seebeck en 1821.

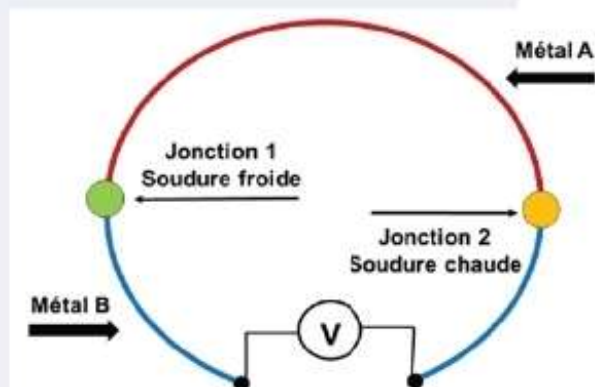
Effet Seebeck (thermocouple). A la jonction de matériaux différents à température différentes, une tension apparaît qui dépend de l'écart de température et de la nature des matériaux. L'effet Seebeck est l'inverse de l'effet Peltier.

Coefficient Seebeck. La tension produite est proportionnelle à la différence de température entre les deux jonctions. La constante de proportionnalité, représentée par S, est connue sous le nom de coefficient Seebeck.

$$S = (V_{\text{chaud}} - V_{\text{froid}}) / (T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}) \text{ [V/K]}$$

Pour chaque matériau, on définit un coefficient de Seebeck

[V × K⁻¹] qui caractérise la tension résultant d'un écart de température de 1 [K]. Les semi-conducteurs ont des coefficients de conversion de quelques [μV] × K⁻¹



Jozef STEPHAN

(1835-1893)

Physicien, mathématicien et poète austro-hongrois.

La loi de Stefan ou de Stefan-Boltzmann définit la relation entre le rayonnement thermique d'un corps noir et sa température (*voir Boltzmann*).

Robert STIRLING

(1790-1878)

Pasteur, mécanicien et métallurgiste écossais. Inventeur du « moteur à air chaud » ou moteur à combustion externe appelé moteur Stirling.

Moteur Stirling. Le moteur à air chaud, également dénommé moteur à combustion externe. L'air en circuit fermé est soumis à un cycle de quatre phases :

- Chauffage isochore ($V = C^{st}$)
- Détente isotherme ($t = C^{st}$)
- Refroidissement isochore ($V = C^{st}$)
- Compression isotherme ($t = C^{st}$)



THALES de Millet(V^{ème} siècle avant JC)

Thalès est le premier mathématicien dont l'histoire a retenu le nom. Il vécut en Asie Mineure et il acquit ses connaissances lors de voyages en Egypte. Ce fut un savant universel et l'un des 7 sages de l'Antiquité.

Thalès est le premier mathématicien dont l'histoire a retenu le nom. Il vécut en Asie Mineure et acquit ses connaissances lors de voyages en Egypte. Ce fut un savant universel, l'un des 7 sages de l'Antiquité. On lui doit le théorème qui porte son nom dont l'une des applications est le tracé de l'évolution de la température dans une paroi séparant deux ambiances à températures différentes.

Trou de Thalès. On raconte que Thalès observant les étoiles sur lesquelles il développait des considérations astronomiques tomba dans un trou. Une servante de Thrace en

l'entendant se lamenter le raila en lui disant : « *Eh bien Thalès : tu n'es pas capable de voir où tu mets les pieds et tu prétends connaître les choses du ciel !* » (Voir 4^{ème} de couverture)

Evangelista TORRICELLI

(1608-1647)

Physicien et mathématicien italien. En 1644, Torricelli a mis en évidence la pression atmosphérique en étudiant la pompe à eau de Galilée, ce qui lui permit d'inventer le baromètre à tube de mercure. Blaise Pascal, dans ses travaux, ne cite pas une seule fois Torricelli, mais en 1651, déclare avoir refait en 1646-1648 à la Tour Saint Jacques et au Puy-de-Dôme une expérience faite (par Torricelli) en Italie en 1644

Baromètre de Torricelli. Le baromètre est une invention mise au point, par accident, par Torricelli ancien secrétaire de Galilée. Torricelli ne s'intéressait pas directement à la pression atmosphérique mais aux jets d'eau des fontaines.

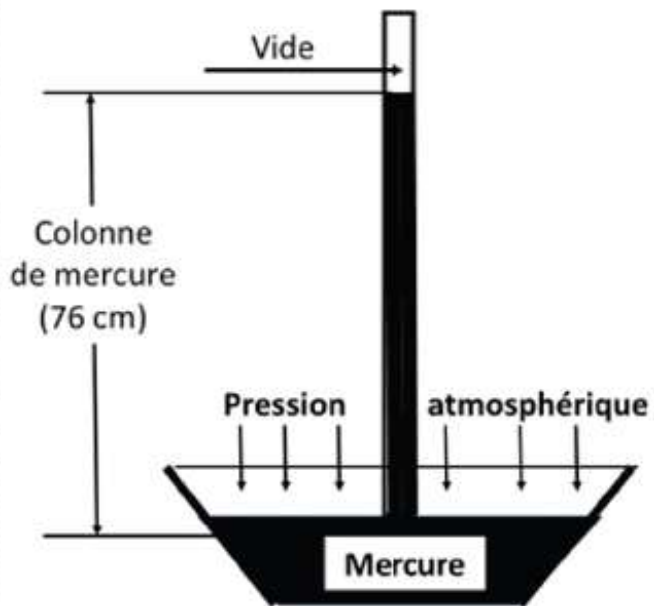
Pourquoi les colonnes d'eau ne s'élèvent pas à plus de 10 mètres ? Pour tenter de percer le mystère Torricelli remplace l'eau par du mercure qui est plus dense (13,6 fois). Il remplit de mercure un tube en verre qu'il renverse sur une bassine d'eau sans laisser entrer d'air à l'intérieur. La quantité de mercure qu'il faut pour remplir les 76 cm de la colonne reproduit la force exercée par une colonne d'eau de 10 m. Il s'aperçoit alors que l'eau ne peut monter à plus de 10 m, pour des raisons physiques.

En 1676, l'Académie des sciences suite aux travaux de Blaise Pascal nomme ce tube « baromètre de Torricelli » et baptise « Torr » son unité de mesure.

Le tube barométrique de Torricelli est composé d'un tube de verre contenant du mercure et dont l'extrémité ouverte (en bas) repose dans un bassin rempli de mercure. Une échelle graduée permettant de lire la pression se trouve sur le tube de verre. Le principe physique du fonctionnement du baromètre est l'équilibre des forces. La colonne de mercure

contenue dans le tube cherche à descendre sous l'effet de son poids. Cependant, l'air environnant pousse sur le mercure dans le bassin. La colonne de mercure cesse de bouger lorsque ces deux forces de poussée sont égales. Lorsque la pression de l'air environnant augmente, elle pousse sur le mercure dans le bassin et fait remonter une certaine

Le tube barométrique de Torricelli est composé d'un tube de verre contenant du mercure et dont l'extrémité ouverte (en bas) repose dans un bassin rempli de mercure. Une échelle graduée permettant de lire la pression se trouve sur le tube de verre. Le principe physique du fonctionnement du baromètre est l'équilibre des forces. La colonne de mercure contenue dans le tube cherche à descendre sous l'effet de son poids. Cependant, l'air environnant pousse sur le mercure dans le bassin. La colonne de mercure cesse de bouger lorsque ces deux forces de poussée sont égales. Lorsque la pression de l'air environnant augmente, elle pousse sur le mercure dans le bassin et fait remonter une certaine quantité de mercure dans le tube de verre. De façon contraire, une baisse du mercure dans le tube sera causée par une diminution de la pression atmosphérique. En observant la hauteur de la colonne de mercure dans le tube, nous disposons donc d'une mesure de la pression de l'air.



quantité de mercure dans le tube de verre. De façon contraire, une baisse du mercure dans le tube sera causée par une diminution de la pression atmosphérique. En observant la hauteur de la colonne de mercure dans le tube, nous disposons donc d'une mesure de la pression de l'air.

« Torr » Unité de pression. Le Torr [Torr] ou millimètre de mercure [mm Hg] est une unité de mesure de la pression (hors système SI) initialement définie comme la pression exercée à 0 °C par une colonne de 1 millimètre de mercure.

Elle a plus tard été indexée sur la pression atmosphérique : 1 [atm] correspond à 760 mmHg et à 101 325 pascals. On en déduit donc que le [Torr] est équivalent à environ 133,322368 Pa.

Formule (ou principe, théorème ou loi) de Torricelli. La formule ou principe de Torricelli est une application de l'équation de Bernoulli qui permet de calculer la vitesse d'un fluide qui sort par une ouverture située sur la paroi d'un récipient.

La vitesse d'écoulement d'un liquide (fluide incompressible) contenu dans un réservoir et s'écoulant par un orifice à paroi mince et de petite dimension ne dépend pas de la nature du liquide.

On devrait avoir : $v = (2.g.h)^{1/2}$

En réalité, l'écoulement se fait non par la section entière de l'orifice, mais par une section réduite par suite de l'étranglement de la veine liquide. Il faut introduire un coefficient de réduction m , coefficient d'ajutage qui dépend de la forme de l'orifice.

Pour un orifice circulaire en paroi mince : $\mu = 0.62$



Giovanni VENTURI

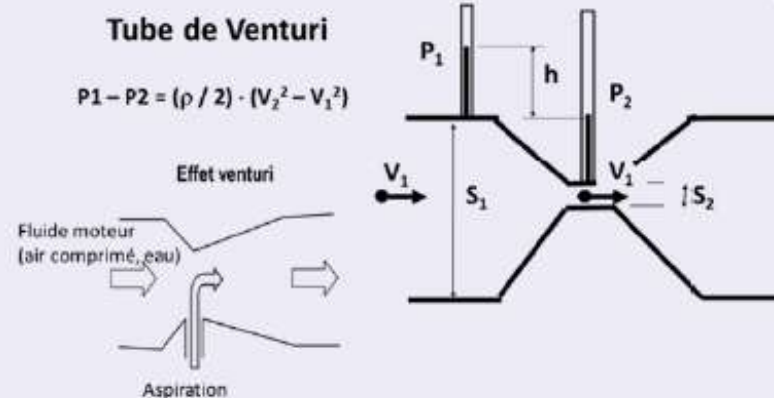
(1746-1822)

Ordonné prêtre, il enseigne la logique dans le séminaire de Reggio d'Émilie.

Puis il devient professeur de géométrie et philosophie à l'Université de Modène et professeur de physique à l'École du génie militaire de Modène.

C'est à la suite de ses nombreux travaux en dynamique des fluides qu'il écrit un ouvrage où il décrit ce qui deviendra l'effet Venturi, qui est la relation très contre-intuitive entre la vitesse d'un fluide et sa pression.

L'effet Venturi, nom donné à un phénomène de la dynamique des fluides, selon lequel un fluide en écoulement subit une dépression là où la vitesse d'écoulement augmente, où la section d'écoulement se réduit, créant ainsi une dépression dans sa partie étroite. L'effet est une manifestation du principe de conservation de l'énergie (formalisé dans le cas des écoulements fluides par le théorème de Bernoulli) et peut s'énoncer de la façon suivante : dans le cas d'un écoulement fluide horizontal, lorsque la vitesse d'écoulement augmente, la pression diminue. On peut également le formuler selon cette variante : dans le cas d'un écoulement horizontal, si la section d'écoulement diminue, la pression dans le fluide diminue également ; dans ce cas, on fait en plus intervenir le principe de conservation de la masse (et donc du débit), qui va causer une augmentation de la vitesse à la suite de la réduction de la section, et de la diminution de la pression.



Le tube de Venturi est utilisé en aéronautique pour mesurer la vitesse relative en vol, mais aussi dans les carburateurs automobiles ainsi que dans les aéroglyphes. Le tube de Venturi est aussi utilisé dans les sites industriels pour mesurer le débit d'un fluide dans une canalisation.

La pompe de Venturi, ou éjecteur, est un assemblage mécanique exploitant la dépression créée par l'effet Venturi et permettant à l'aide d'un premier fluide pressurisé, de com-

primer un second fluide en les mélangeant, sans aucune pièce mobile transmettant de l'énergie aux fluides. Il peut être utilisé dans de nombreux domaines, par exemple l'extraction des fumées, l'obtention d'un vide ou encore sur certaines machines de climatisation et dans bien d'autres domaines.

Un fluide est injecté à grande vitesse à l'entrée du Venturi, généralement de la vapeur d'eau, de l'air comprimé, ou encore un fluide frigorigène, mais il existe aussi des hydro-éjecteurs.

Marcel VERON

(1932-2022)

Centralien, membre de l'Académie des Sciences

Professeur à l'Ecole Centrale et au CNAM, on lui doit des cours : un traité de chauffage et un de thermique qui sont des références et ont formé de nombreux thermiciens.

Louis VOILLOT

(1932-2022)

Président de l'AICVF (1985-1990)

Voici ce que Louis VOILLOT disait de sa présidence : « J'ai eu le privilège de présider l'AICVF de 1985 à 1990. Cette prestigieuse association eut pour premier président Albert NILUS, polytechnicien, de 1910 à 1913. Les nombreux documents techniques de l'AICVF ont apporté un sérieux soutien aux installateurs et exploitants. J'ai eu l'honneur de recevoir le prix Sadi Carnot pour l'un de mes livres : La pratique de l'économie d'énergie. Cette réalisation doit beaucoup à mes relations de l'AICVF lors de nos échanges techniques. De nombreuses sociétés sont devenues adhérentes au titre de membres personnes morales. À l'époque, les statuts les désignaient comme membres bienfaiteurs. Je les ai modifiés car je considérais que les bienfaiteurs étaient les nombreux

membres individuels qui se dévouaient à la cause de l'AICVF, à Paris comme en régions. D'autre part, je ne comprenais pas pourquoi aucune femme n'avait de poste, en commission technique comme au conseil d'administration ; c'est pourquoi j'ai invité Francine BRENIERE à y siéger. Hélas, Francine est aujourd'hui décédée. J'ai la fierté d'avoir fait réaliser le dernier insigne¹ de l'AICVF que de nombreux membres ont porté et portent toujours. J'avais veillé à mettre Dunkerque sur une pointe de l'hexagone. Avec mes vœux de continuité dans le succès. »

1. A propos du logo de l'AICVF : on disait de Louis Voillot qu'il avait redressé la France. En effet, c'est lui qui a mis la pointe de l'Hexagone à Dunkerque !



Au centre : Louis Voillot Président AICVF, à gauche Francis Subra Président AICVF Ile de France et à droite Roger Cadiergues Conseiller technique de l'AICVF. (Photo ML 1980)

Alessandro VOLTA

(1745-1827)

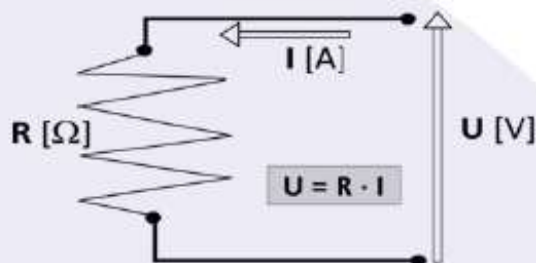
Physicien et chimiste italien. Travaux sur l'électricité.

Il est l'inventeur de la pile dite voltaïque.

On donna son nom au Volt unité de mesure de différence de potentiel.

En 1787 il a découvert l'effet SEEBECK qui fut découvert à nouveau par Thomas Alessandro SEEBECK (*Voir Seebeck*).

Volt [V]. Unité de différence de potentiel (tension) du système SI. Le volt [V] est la différence de potentiel entre 2 points d'un circuit électrique de résistance 1 [W] lorsque le circuit est parcouru par un courant continu de 1 [A]. La puissance dégagée est alors de 1 [W].



Pile électrique de Volta dite pile voltaïque (1800). La pile est constituée d'un empilement de disques de zinc (pôle négatif) et de cuivre (pôle positif) séparés de tissus imprégnés

d'eau salée (saumure). La répétition des éléments zinc-saumure-cuivre est proportionnelle à la tension délivrée [V].

James WATT

(1736-1819)

Ecossais, ingénieur mécanicien et mathématicien.

Il a perfectionné la machine à vapeur et ses améliorations furent des étapes clés dans la révolution industrielle.

Le **Watt [W]**. Unité de puissance, ou de flux énergétique, unité dérivée du système SI.

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule} / 1 \text{ seconde}$$

Le wattheure [Wh] est une unité de travail et de quantité d'énergie.

$$1.1 \text{Wh} = (60 \cdot 60) \text{ J} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ J}$$

1 MWh correspond à 0,86 tonne de pétrole.

Machine à vapeur de Watt. Watt n'est pas l'inventeur de la machine à vapeur et n'est pas le seul responsable des développements techniques qui portent son nom, mais il fut l'élément moteur qui fit de la machine la source d'énergie préférée de nombreuses usines, mines, machines agricoles et modes de transport.

Watt et son associé Matthew Boulton (1728-1809) fabriquèrent et vendirent près de 500 machines à vapeur avant que leur brevet ne prenne fin en 1800 et que d'autres investisseurs ne se chargent d'améliorer davantage la puissance et l'efficacité de la machine à vapeur.



Sources des illustrations

Page	Sujet	Source
Couv	La Fée électrique de Raoul Dufy	
18	Ampèremètre ancien	Wikipédia
	Bonhomme d'Ampère	Doc. Le Futur des Energies
	Règle des 3 doigts	Wikipédia
21	Vis d'Archimède	Doc. Shutterstock offert par 4 INSIDE
23	Cycle Beau de Rochas	Doc. tpdemain.com
30	Cycle de Carnot	Doc. ABC CLIM
33	Thermomètre de Lyon	Doc. decitre.livres
40	Cycle Diesel	Doc. Schoolo
41	Vase Dewar	Doc. Claude Gimenes
43	Monument à Fahrenheit	Doc. Atlas Obscura
45	Thermomètre de Galilée	Doc. Objets scientifiques
55	Montgolfière	Doc. montgolfière-sensation.com
59	Règle à calcul	Wikipédia
61	Pascaline	Wikipédia
63	Jamais contenté	Doc. Caradisiac
64	Prandtl	Wikipédia
66	Thermomètre de Réaumur	Wikipédia
69	Echelle de Ringelmann	Wikipédia
71	Moteur Stirling	Doc. Déco Sciences
77	Machine de Watt	Doc. Université polytechnique de Madrid
79	Ada Lovelace	Doc. Université de Poitiers
80	Marie Curie	Wikipédia

Attributs de thermiciens ou physiciens.

Quelques attributs sont souvent associés aux noms des savants.
(liste non exhaustive)

L'attribut ↓	Le thermicien ou physicien ↓
Bilan carbone, empreinte carbone	Jean-Marc JANCOVICI
Crève tonneau (le)	Blaise PASCAL
Degré Celsius [°C] - L'échelle thermométrique centésimale	Anders CELSIUS
Euréka, la poussée d'Archimède	ARCHIMEDE de Syracuse
Gaz parfaits - Loi des gaz parfaits	Emile CLAPEYRON
Joule [J], unité de travail	James Prescott JOULE
Kelvin [K], unité de température thermodynamique	William THOMSON, Lord KELVIN
Ohm(l') [Ω], unité de résistance électrique	Georg OHM
Olfet Decipol, indices de confort olfactique	Pole Eole FANGER
Pertes de charge. Formule d'hydrodynamique	Daniel BERNOULLI
PMV et PPD, indices de confort thermique	Pole Eole FANGER
Pomme - La pomme de Newton	Issac NEWTON
Pont aux ânes (théorème du) - Théorème de Pythagore	PYTHAGORE de Samos
Relativité (la)	Albert EINSTEIN
Trou, le trou de Thalès	THALES de Millet
Tube de Pitot	Henri PITOT
Vase, flacon, bouteille... de Mariotte	Edme MARIOTTE

Et les femmes dans tout ça ?

Il n'aura échappé à aucun lecteur l'absence de référence à des femmes climaticiennes : discipline boudée ou symptôme de l'effacement des femmes dans l'histoire, et les sciences notamment ?

Si les femmes n'étaient pas au-devant de la scène, nul doute que certaines ont participé a minima aux recherches de ces hommes de sciences. Sous-représentées dans les domaines scientifiques en raison de divers obstacles sociaux, culturels et institutionnels, leur contribution à la science et à l'ingénierie est pourtant indéniable et maintenant enfin reconnue.

Dans la discipline précise du génie climatique, il est effectivement difficile de retrouver des noms de femmes ayant participé activement ou assisté lors de l'élaboration de lois comme celles proposées dans cet ouvrage. De manière plus large, on retrouve plus facilement des contributions féminines dans les sciences fondamentales : et rares sont les femmes connues avant le 17^{ème} siècle. C'est à partir de Maria Cunitz (17^{ème} siècle), astronome polonaise et surtout 3 siècles plus tard avec Marie Curie, figure de proue, que les femmes se sont révélées dans l'histoire.

Nous profitons donc de cet espace pour rappeler une petite part des grandes contributions féminines (re)connues à la Science.



MARIA CUNITZ (1610-1664)

Astronome silésienne (région majoritairement polonaise actuellement), elle publie un ouvrage d'astronomie dans lequel elle démontre une grande maîtrise des mathématiques avancées et du calcul astronomique, ainsi qu'une compréhension approfondie des travaux de Johannes Kepler en astronomie. Elle y apporte aussi une simplification et corrige les calculs de Kepler concernant les positions des planètes ; de plus, ce livre est publié en latin et en allemand afin d'atteindre un public plus large.

ÉMILIE DU CHÂTELET (1706-1749)

Mathématicienne et physicienne française, elle a traduit les « Principia Mathematica » d'Isaac Newton en français, rendant ainsi les théories de Newton accessibles à un public plus large. Elle a également mené des recherches importantes en physique et en mathématiques, contribuant à la compréhension des lois de la conservation de l'énergie.

ADA LOVELACE (1815-1852)

Pionnière anglaise de la science informatique, elle décrit une méthode très détaillée pour calculer les nombres de Bernoulli avec la machine. Elle est ainsi considérée comme l'inventeur du premier programme informatique de l'histoire. Le nom du langage de programmation Ada sera plus tard choisi en son honneur.

EUNICE NEWTON FOOTE (1819-1888)

Scientifique américaine, elle a été l'une des premières à découvrir les gaz à effet de serre et leur rôle dans les variations climatiques. Ses travaux ont jeté les bases de la compréhension moderne du changement climatique. Elle a réalisé une série d'expériences montrant que les gaz comme le CO₂ et la vapeur d'eau absorbent davantage la chaleur solaire que l'air. Elle

en a déduit que des niveaux plus élevés de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pouvaient entraîner une élévation de la température terrestre – une hypothèse précoce du mécanisme de l'effet de serre, formulée bien avant que ce phénomène ne soit officiellement reconnu par la communauté scientifique.

AMALIE EMMY NOETHER (1882 - 1935)

Mathématicienne allemande spécialiste d'algèbre abstraite et de physique théorique. Elle est reconnue comme l'une des figures les plus influentes de l'histoire des mathématiques modernes. Albert Einstein lui-même la qualifiait de « plus grand génie mathématique créatif apparu depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures ». Ses travaux ont profondément transformé des domaines clés tels que la théorie des anneaux, des corps et des algèbres. En physique, elle est surtout connue pour le théorème de Noether, un résultat fondamental qui établit un lien direct entre les symétries d'un système physique et les lois de conservation – un principe aussi central à la physique moderne que la relativité.

MARIE CURIE (1867-1934)

Physicienne et chimiste polonaise, naturalisée française. Elle a été la première à démontrer que la radioactivité est



Marie Curie

une propriété atomique fondamentale, révolutionnant la compréhension de la matière. Ses travaux ont ouvert la voie à des avancées majeures en physique nucléaire, en médecine (notamment la radiothérapie) et en chimie. Ses travaux ont permis des implications indirectes dans le domaine de la thermodynamique. Par exemple, ils ont révélé qu'un atome pouvait spontanément libérer de l'énergie sous forme de rayonnement. L'énergie dégagée par les substances radioactives, comme le radium, a montré qu'il existait des processus capables de produire de la chaleur sans combustion ni réaction chimique, bouleversant les notions d'énergie et de chaleur en vigueur à l'époque. Ces découvertes ont contribué à la transition vers la physique nucléaire, qui a ensuite permis d'affiner les concepts de conservation d'énergie, notamment dans des contextes où la matière est convertie en énergie (comme formulé par Einstein), un principe aujourd'hui intégré aux lois thermodynamiques généralisées.

ROSALIND FRANKLIN (1920-1958)

Physicochimiste britannique. Reconnue en particulier pour ses travaux sur l'ADN, elle a également contribué à la compréhension des propriétés thermiques des matériaux biologiques. Ses recherches ont aidé à élucider les structures moléculaires et leurs interactions thermiques.

Aujourd'hui, les femmes représentent environ 30 % des chercheurs, et leur nombre diminue à mesure qu'elles avancent dans leur carrière. Cette sous-représentation est particulièrement visible dans les échelons supérieurs de l'influence scientifique, où seulement 16 % des membres des académies des sciences sont des femmes. Il reste donc encore beaucoup à faire pour atteindre une véritable égalité des genres dans les sciences et le génie climatique. Les initiatives actuelles visent à créer des milieux plus inclusifs et à encourager les femmes à poursuivre des carrières dans ces domaines.

A son échelle, l'AICVF soutient la féminisation du métier. Le Comité Technique accueille en 2025 25 % de femmes. Du chemin est encore à parcourir quand 90 % des membres restent des hommes.

ANNEXE A

Les 7 unités de base du système SI

En 1791 CONDORCET fut chargé d'unifier les poids et mesures. Et en 1799 un système métrique cohérent est mis en place en France. Dans l'intervalle de temps l'idée des personnalités (CONDORCET, BORDA, LAPLACE, LAGRANGE ET MONGE) en charge de ce projet était de construire un système international d'unités. Les tensions entre la France et l'Angleterre ont fait que cette dernière a refusé de s'impliquer dans ce système international. C'est seulement en 1875 que la signature de la convention a permis d'avoir enfin un système international d'unités.

Une définition du mètre est donnée en 1799, qui restera valide jusqu'en 1983. Le mètre étant alors défini comme la dix-millionième partie de la distance entre l'équateur et le pôle mesurée le long de la surface de la Terre. Une définition de la seconde est aussi donnée qui restera valide jusqu'en 1960. La seconde était définie comme la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen.

C'est en 1960 que la 11^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (GPM) finalise le « Système international » (SI). Un système d'unités doit être un système cohérent, rationalisé et doit couvrir l'ensemble du champ disciplinaire de la physique. Le SI comporte 7 unités de base :



La 26^{ème} Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a procédé à une révision du Système international parmi les plus importantes depuis sa création : les délégués représentant 60 pays ont voté la redéfinition de 4 des 7 unités de base qui le constituent : le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole. Les définitions des 7 unités de base du SI sont désormais dématérialisées, et fondées sur 7 constantes de la physique, dans l'objectif de garantir leur stabilité et leur universalité et mettent un terme au lien entre le SI et les artefacts matériels. Cette révision du SI est le fruit d'une coopération scientifique intense entre le Bureau international des poids et mesures (BIPM) et les laboratoires nationaux de métrologie, pour la France le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Les nouvelles définitions sont en vigueur depuis le 20 mai 2019, Journée mondiale de la métrologie, qui célèbre la mise en place du SI, ou système métrique, en 1875.

Les unités de base SI sont maintenant définies à partir de sept constantes physiques¹ dont la valeur exacte a été fixée définitivement. Les nouvelles constantes sont :

- La fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$, est égale à $9\,192\,631\,770$ Hz ;
- La vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à $299\,792\,458$ m/s ;
- La constante de Planck, h , est égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s ;
- La charge élémentaire, e , est égale à $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C ;
- La constante de Boltzmann, k , est égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K ;
- La constante d'Avogadro [N_A] est égale à $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ [mol⁻¹] ;
- L'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ [Hz] est égale à 683 [lm/W]

1. Une constante physique est une quantité physique dont la valeur numérique est fixe

Où les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui

ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol et cd, selon les relations $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, et $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$.

Unité SI	Ancienne définition	Définition en vigueur (redéfinition de 2019)
Le mètre [m] Unité de longueur	C'était la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde (la toute première définition de 1791 était : la 10 millionième partie du quart du méridien terrestre).	La valeur du mètre est définie en fixant la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide à exactement 299 792 458, quand elle est exprimée en [m/s].
Le kilogramme [kg] Unité de masse	La valeur kilogramme était la masse de l'étalon déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres.	La valeur du kilogramme est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quand elle est exprimée en [m ² .kg/s], ce qui correspond à des [J.s].
La seconde [s] Unité de temps	La seconde était la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température du zéro absolu.	La valeur de la seconde est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium. La seconde est égale à la durée de 9 192 631 770 périodes correspondant à la transition entre les 2 niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé.
L'ampère [A] Unité de courant électrique	L'ampère était l'intensité du courant continu qui, s'il était maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placé à 1 [m] l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} [N /m] par mètre de longueur.	L'ampère est défini en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire e égale à : $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$
Le kelvin [K] Unité de température thermodynamique	La valeur de l'ancienne définition du kelvin, était égale à : 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.	Le kelvin « est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k, égale à : $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en [J. K ⁻¹]
La mole [mol] Unité de quantité de matière	L'ancienne définition de la mole était « la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 1213.	La valeur de la mole [mol] est définie en fixant la valeur numérique du nombre d'Avogadro à exactement 6,022 14076.1023 quand elle est exprimée en mol.
La candéla [cd] Unité d'intensité lumineuse	La candela était « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1 683 watt par stéradian ».	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 [W/st].

ANNEXE B

Personnes morales liées au Génie Climatique

✓ **A²E²TH - Association Amicale des Anciens Elèves de l'Ecole de Thermique.**
Maintenant dissoute. Publiait l'Aide-mémoire de la thermique.

✓ **ACR - Syndicat des Automatismes du génie Climatique et de la Régulation.**

✓ **ADEME - Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.**
Etablissement public à caractère industriel et commercial français dont la vocation est de susciter, animer, coordonner, faciliter ou réaliser des opérations de protection de l'environnement et surtout de maîtrise de l'énergie. Créée en 1991 pour remplacer l'AFME - Agence française pour la maîtrise de l'énergie, elle-même créée en réaction à la crise de l'énergie induite par le choc pétrolier de 1973. Elle porte aussi le nom depuis 2020 d'« Agence de la transition écologique ».

✓ **AFNOR**
Groupe français de normalisation et de certification issu de la fusion de l'Association française de normalisation et de l'Association française pour l'assurance de la qualité (AFAQ). Comprend la normalisation, la certification, l'édition spécialisée et la formation.

✓ **AFPAC - Association française pour la pompe à chaleur.**

✓ **AICVF - Association des Ingénieurs et technicien en climatique, ventilation et froid.**
Association à but non lucratif, régie par la loi de 1901 qui poursuit plusieurs objectifs : « *Contribuer au développement scientifique, technique et technologique des industries du chauffage, de la ventilation, du conditionnement d'air, du froid et de la régulation, ainsi que de leurs branches connexes qui concourent, dans le respect de l'environnement, à la maîtrise des éco climats, et à l'accroissement de la performance énergétique des bâtiments* » ; « *Contribuer à la maîtrise des ambiances et des climats intérieurs* » ; « *Assurer l'information, la formation et le perfectionnement de ses membres et des acteurs du secteur* » ;

« *Entretenir des relations amicales entre ses adhérents, leur venir en aide en recherchant et en leur faisant connaître les situations et emplois auxquels ils peuvent aspirer...* ».

L'Association ne poursuit qu'un but d'intérêt général. Créée en 1910, l'AICVF regroupe (aujourd'hui) près de 1900 membres individuels et une centaine de membres personnes morales. Elle comprend des instances statutaires nationales, Bureau et Conseil d'Administration, 17 groupes régionaux dotés chacun d'un Bureau, des comités nationaux. « Société savante » l'AICVF, produit depuis sa création des documents de référence afin de guider les professionnels dans la réalisation de leurs installations de génie climatique. Dénommés guides comme les fascicules rouges - déperditions thermiques (1950) et calculs de charges thermiques (1959) - ce sont maintenant des « recommandations » périodiquement actualisées.



Apports thermiques dans les bâtiments et Déperditions thermiques des locaux en régime continu.



Recommandation AICVF Chauffage : déperditions de base (2019)

Il y a aussi le diagramme de l'air humide à la base du dimensionnement de nombreuses installations de climatisation et de conditionnement d'air réalisé par Roger CASARI et qui est encore largement utilisé. Connu sous le nom de « Diagramme de l'AICVF ». Citons également les fiches bleues attachées à la revue CVC qui commentaient les textes réglementaires et en particulier les décrets et arrêtés constituant le

Règlement de construction pour en faciliter son application.

Il faut aussi citer la revue CVC : Chauffage, Ventilation, Conditionnement d'air, la revue des climaticiens...

Les recommandations de l'AICVF. Pour les installations de génie climatique, sont des ouvrages de référence :

- 01.2019 Chauffage, déperditions de base :
- 02.2004 Eau chaude sanitaire :
- 03.2005 Mise en œuvre des centrales de traitement d'air
- 04.2007 OAI et ventilation
- 05.2009 Poutres froides
- 06.2012 Protections solaires
- 07.2014 Réglementation climatique et thermique
- 08.2014 Apports internes



Ancien logo de l'AICVF (1985)



Nouveau logo de l'AICVF (2023)

✓ **CLIMAGORA**

Marque de l'AICVF.

Mars 2006 marque le début de la série des 8 colloques CLIMAGORA* organisés par l'AICVF sur la déclinaison du thème « confort thermique durable : les points clés ». Ces colloques sont organisés par l'AICVF, en collaboration avec UCF, FG3E, en partenariat avec ADEME, EDF, GDF, Chaleurfioul. Ils ont reçu le parrainage du Délégué interministériel au développement durable M. Christian BRODHAG. CLIMAGORA

PROMOTION, société à responsabilité limitée, a été active pendant 11 ans. Installée à PARIS 8 (75008), elle était spécialisée dans le secteur d'activité de l'édition de revues et périodiques. Sur l'année 2015, elle réalise un chiffre d'affaires de 102 400,00 €. Le total du bilan a diminué de 5,56 % entre 2014 et 2015. Société.com recense 1 établissement et le dernier événement notable de cette entreprise date du 26-01-2017.

Jean PRADERE, était gérant de la société CLIMAGORA PROMOTION radiée en 2017.

Le Prix Climagora (anciennement Prix Michel Papineau, du nom d'un membre qui fut à l'origine des fiches techniques de la revue CVC) récompense une, parmi les meilleures contributions écrites des membres de l'AICVF (article, fiche technique, contribution à un guide ou à une recommandation...) parue dans la revue CVC ou dans les publications de l'AICVF.

Ce Prix est décerné par le Jury, à un auteur/ une auteure, sur proposition des présidents des Comités Technique et de la Revue.

✓ **AQC - Agence qualité construction.**

Association dont les missions sont de prévenir les désordres et d'améliorer la qualité de la construction. L'AQC informe les professionnels du bâtiment sur le sujet des désordres. Les moyens d'information sont des plaquettes pour les professionnels ou les particuliers et également de sites internet dédiés, d'une revue ou d'applications.

✓ **AREC IdF - Agence régionale énergie-climat d'Ile-de-France.**

Lancée officiellement le 4 avril 2019 par la Région Île-de-France, l'AREC IdF est un département de l'Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Île-de-France (IAU IdF). Son objectif est de faciliter et d'accélérer la transition énergétique et l'adaptation au changement climatique en assistant les collectivités et autres acteurs franciliens.

✓ **ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**

est une organisation internationale technique du génie climatique. L'AICVF est membre associé de l'ASHRAE

✓ **CAPEB – Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment.**

Syndicat professionnel français réunissant de petites entreprises artisanales du bâtiment. Les entreprises sont regroupées en familles de métiers comme Couverture et Plomberie-Chauffage.

✓ **CEN / CENELEC – Le Comité européen de Normalisation et le Comité Européen de Normalisation en Electronique et en Electrotechnique** sont composés des comités nationaux de pays européens.

✓ **CETIAT – Le Centre Technique des Industries Aérouliques et Thermiques** est un établissement d'utilité publique créé en 1960 à la demande des industriels des secteurs de l'aéroulique et de la thermique. Acteur de l'écosystème industriel français et international, le centre technique est un trait d'union entre l'industrie et la recherche. En tant qu'organisme expert pour les études, les essais, les étalonnages et les formations, il permet aux industriels de tout secteur de disposer de moyens et de compétences pour mieux concevoir, développer et fabriquer leurs produits et procédés, évaluer et améliorer leurs performances.

✓ **COSTIC – Le Comité scientifique et technique des industries climatiques** exerce des activités de formation, d'études et diffusion d'informations techniques à destination du personnel des entreprises d'installation et de maintenance d'équipements du génie climatique du bâtiment.

✓ **CSTB – Le Centre scientifique et technique du bâtiment.** Fondé en 1947 pour accompagner la reconstruction d'après-guerre en France, c'est un établissement public français à caractère industriel et commercial (EPIC). Il est placé sous la tutelle des ministères chargés de la construction et de la recherche. Le CSTB vise à promouvoir une construction durable, sûre et économe en ressources, tout en prenant en compte les enjeux environnementaux et économiques.

✓ **GPF – Gaz Purs et Fluides.** Société spécialisée dans les réseaux de gaz médicaux, de la conception à l'installation au dépannage et à la formation.

✓ **ISO / CEI – Organisation Internationale de Normalisation et Commission Electrotechnique Internationale.** Organisations internationales composées des représentants d'organisations nationales de normalisation de 167 pays.

✓ **REHVA – Federation of Heating, Refrigerating and Air Associations.** LAICVF est membre de REHVA.

✓ **SNEFCCA – Syndicat National des Entreprises du Froid, d'Equipements de Cuisines Professionnelles et du Conditionnement d'Air.**

✓ **SYNASAV – Syndicat National de la Maintenance et des Services en Efficacité Energétique.**

✓ **UMGCCP – Union des Métiers du Génie Climatique Couverture et Plomberie,** syndicat affilié à la FFB (Fédération Française du Bâtiment).

✓ **UNICLIMA – Syndicat des Industries aérouliques et thermiques.**

✓ **Xpair – Média ciblé performance énergétique et environnementale,** rassemble l'information technique de la profession, où les concepts sont mis en valeur. Organisateur de EnerJ-meeting, journées de l'efficacité Energétique et Environnementale du Bâtiment.



adhésion

MI
ACCESS

Devenez Membre Individuel (MI)

Maître d'ouvrage, Bureau d'étude, architecte, AMO, installateur, mainteneur, professionnel du CVC, enseignant, étudiant

**Vous êtes acteur
du marché de l'Energie**
Accédez aux contacts,
aux services et aux outils
du 1^{er} réseau professionnel
du génie climatique de votre Région

>>>>

Devenez Membre en 1 clic :

<https://aicvf-france.assoconnect.com/contacts/registration?redirect=>



linkedin.com/company/aicvf



ENSEMBLE, FAÇONNONS L'AVENIR DU GÉNIE CLIMATIQUE
ET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE