

NOTIONS FONDAMENTALES

1.1. OBJECTIFS POURSUIVIS

Les transferts thermiques font partie des Sciences de base de l'ingénieur, tant il est vrai qu'il est peu de domaines industriels où la thermique ne joue un rôle petit ou grand. Au minimum, l'ingénieur doit donc :

- en connaître les principes fondamentaux,
- être capable d'évaluer leur importance dans un problème particulier,
- dégager les ordres de grandeur par une modélisation simple.

Ce cours d'introduction vise donc l'acquisition des notions minimales, il ne peut suffire à la formation d'un ingénieur thermicien. Les références bibliographiques sont là pour approfondir.

Il a été privilégié un mode de présentation qui met en relief les éléments absolument indispensables à retenir. Ils sont marqués par l'encadrement :

A retenir absolument

Les deux notions fondamentales en transferts thermiques sont **la température et la chaleur**. Le langage courant introduit souvent une confusion entre elles. Nos réactions physiologiques en sont en partie responsables : toucher du bout des doigts une porte en bois ou sa poignée métallique ne procure pas la même sensation ; la seconde paraît plus froide alors que toutes deux sont à la même température. Ceci parce que nos organes du toucher enregistrent le flux thermique qu'ils reçoivent ou cèdent. La poignée semble plus froide parce que son métal est plus émissif que le bois.

De même, on entend opposer : *température à l'ombre* et *température au soleil*. En réalité, la mesure d'une *température d'air* ne peut se faire qu'en protégeant la sonde de mesure des effets du rayonnement donc « à l'ombre ». S'intéresser à la *température au soleil* sous entend qu'on souhaite intégrer en une seule mesure les effets de la température *et* la chaleur reçue du soleil par rayonnement.

De même, on parle au Canada de *température « avec facteur vent »* (– 20°C annoncés comme – 30°C avec facteur vent). Là encore, on effectue, sans le dire explicitement, un bilan de chaleur tenant compte d'échanges convectifs accrus du fait de la vitesse du vent.

La température caractérise **l'état d'un corps** ; la chaleur exprime **une énergie échangée**. Les notions de température et de chaleur constituent l'objet de ce cours.

1.2. NOTION DE TEMPERATURE

C'est une **variable d'état** qui, du point de vue de la structure intime de la matière, caractérise le degré d'agitation de ses particules. Elle résulte donc de la détermination d'une moyenne et, de ce fait, il est impossible en toute rigueur de définir la température en un point géométrique.

Les moyens d'observation explorent un domaine fini (de l'ordre du mm^3 ou même moins). Ce domaine très restreint contient encore un nombre de particules suffisant pour que les considérations statistiques aient un sens. C'est donc toujours la température d'une boule au voisinage d'un point que l'on mesure, et que l'on désigne par "température en ce point".

Nous dirons qu'à l'instant t la température d'un corps est **uniforme** si, en cet instant, tous les appareils de mesure indiquent la même valeur T quelle que soit leur position. Nous dirons en outre qu'elle est **constante** si T est indépendante de l'instant d'observation. Si ces deux conditions ne sont pas réalisées, nous dirons que la température est une fonction $T(x,y,z,t)$ des coordonnées du repère d'espace-temps. A l'intérieur d'un corps homogène, on peut donc définir à chaque instant t des surfaces isothermes caractérisées par $T(x,y,z,t) = \text{cte}$.

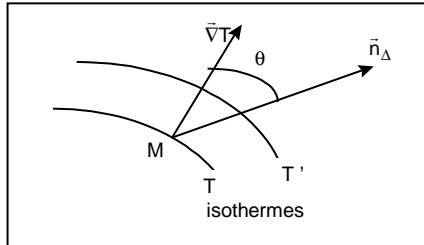
L'unité de température est définie officiellement comme suit (J.O. 23/12/75) : "Le Kelvin (K) est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. "

On utilise fréquemment la température Celsius définie par la différence $T - T_0$ entre deux températures thermodynamiques T et T_0 avec $T_0 = 273,15$ K. Un intervalle ou une différence de température peuvent s'exprimer soit en Kelvins, soit en degrés Celsius.

Gradient thermique

La dérivabilité de la fonction T permet de définir en chaque point M et à chaque instant t un vecteur gradient de température $\vec{\nabla}T$, normal en M à la surface isotherme¹, et dont les composantes sont en coordonnées cartésiennes :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$



On définit également le **gradient de température dans une direction Δ** , $\vec{\nabla}_\Delta T$ comme le produit scalaire

¹ Ceci n'est vrai que pour un corps isotrope, voir définition au § 2.1.2

$$\vec{\nabla}_{\Delta} T = \vec{\nabla} T \cdot \vec{n}_{\Delta} = \|\vec{\nabla} T\| \cdot \cos\theta$$

En l'absence de précision, le terme gradient désigne celui dans la direction normale à une surface.

1.3. NOTION DE CHALEUR

1.3.1. DEFINITIONS

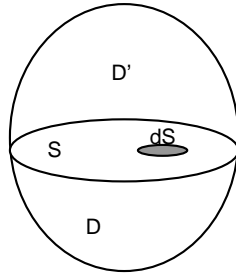
C'est une forme d'énergie au même titre que le travail d'un système de forces au cours d'un déplacement. On ne peut donc pas parler de la "chaleur d'un corps", ni même de la "chaleur contenue dans un corps", car la prise en compte d'une quantité de chaleur Q implique une situation évolutive. Il s'agit forcément d'un **échange d'énergie** entre plusieurs corps (ou entre plusieurs domaines d'un même corps) au cours d'un laps de temps déterminé. L'unité est le **Joule** [J]. Sa valeur est petite, ce qui fait qu'on a communément recours au kilo Joule [kJ].

Si, entre deux instants t et t' , l'interaction étudiée s'accompagne d'un échange de chaleur δQ , on appelle flux thermique moyen la quantité $\delta Q/(t-t')$ et, par un passage à la limite, on peut définir :

- Un **flux² (c'est une puissance) thermique** instantanée en Watts [**W**],
- ramenée à l'unité de surface on parle de **densité de flux thermique** [**W/m²**]. On nomme flux-mètre l'appareil de mesure correspondant.

1.3.2. ECHANGE DE CHALEUR A TRAVERS UNE SURFACE

Considérons deux domaines D et D' séparés par une surface S et supposons que D cède (algébriquement) à D' , un flux thermique Φ (pas forcément constant dans le temps).



La nature des corps D et D' , peut être absolument quelconque ; par exemple, D peut être un solide et D' un fluide ; ou bien D et D' peuvent être deux parties d'un même milieu et S une surface fictive tracée dans ce milieu. On définit la **densité de flux thermique** à travers S comme $\bar{\varphi} = \frac{\Phi}{S}$.

Au niveau corpusculaire, dire que D et D' , échangent un flux Φ signifie ceci : les corpuscules de D proches de S traversent cette surface et communiquent à ceux de D' , des impulsions qui modifient leur vitesse d'agitation, et vice versa. Le bilan net de ces échanges est ressenti au plan macroscopique comme une puissance thermique. La Thermodynamique Statistique permet effectivement le calcul dans un certain nombre de cas.

2. Dans le cours de Thermodynamique, on réserve le mot "flux" à ce qui est transféré par unité de surface.

1.3.3. UNITES SI ET UNITES PRATIQUES

Avant l'obligation d'utiliser les unités SI, les thermiciens avaient généralisé l'emploi d'unités dans lesquelles la chaleur s'exprimait en kilocalories (kcal) ou en thermies (1 th = 1000 kcal), et les intervalles de temps en heures. De plus, on est souvent confronté aux unités anglo saxonnes. Il est donc indispensable de mentionner les formules de passage :

Energie ³	1 kcal = 4,18 kJ
	1 thermie = 1000 kcal = 4180 kJ
	1 BTU = 1,055 kJ
	1 kWh = 3600 kJ
Puissance	1 kcal/h = 1,16 W
	1 BTU/h = 0,2929 W
	1 cheval vapeur (horse power) = 0,746 kW
	1 BTU.ft ⁻² .h ⁻¹ = 3,1525 W.m ⁻²
Chaleur spécifique	1 BTU.lb ⁻¹ .°F ⁻¹ = 4,184 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
	1 cal.g ⁻¹ .°C ⁻¹ = 4,184 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité	1 BTU.ft ⁻¹ .h ⁻¹ .°F ⁻¹ = 1,73 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Conductance	1 BTU.ft ⁻² .h ⁻¹ .°F ⁻¹ = 5,6745 W.m ⁻² .K ⁻¹
Température	Fahrenheit ⁴ : x °F correspond à (x - 32)/1,8 °C
	Celsius : x °C = (x - 273,15) K
	Rankine : x °R = (x/1,8) K (même graduation que °F)
Viscosité dynamique	1 Poiseuille = 1 Pa.s = 1 kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
	1 centipoise = 0,001 Pa.s
	soit encore 10 centipoise = 0,01 Pa.s = un centième de Poiseuille
Viscosité cinématique	1 centistokes = 1.10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹

³ Cette formule de conversion bien connue doit rappeler qu'en 1847 James Joule établit l'équivalence entre le travail et la chaleur en enfermant un moteur dans une enceinte calorifugée emplies d'eau et en mesurant l'élévation de température.

⁴ 100 °F correspondent à la température intérieure du corps humain : 37,7°C.

1.4. EXEMPLES DE RELATIONS TEMPERATURE-CHALEUR

1.4.1. CHAUFFAGE D'UN CORPS HOMOGENE

Si l'on fournit une quantité de chaleur δQ à un corps monophasique homogène de masse m [kg], on sait que, toute autre grandeur d'état restant constante, sa température s'élève. Si le corps se trouve initialement à une température uniforme T_0 et si on attend que la température redevienne uniforme, soit $T_f = T_0 + dT$, on peut poser : $\delta Q = mc.dT$

c la chaleur massique [J/(kg.K)] qui dépend de l'état du milieu (température, pression, etc...), et de la nature de la transformation (volume constant, pression constante, etc...). Pour les solides et les liquides, la nature de la transformation a peu d'influence. Pour les gaz, c'est la capacité thermique à pression constante (c_p) qui intervient⁵. Simplification supplémentaire, la gamme de variation de température est souvent suffisamment faible pour que les variations correspondantes de c soient négligées, en adoptant au besoin la valeur correspondant à une température moyenne.

$Q = mc.(T_f - T_0)$ pour un fluide ou un liquide

$Q = mc_p.(T_f - T_0)$ pour un gaz (à pression constante)

1.4.2. INTERACTION ENTRE DEUX CORPS

Si l'on met en présence deux corps à des températures uniformes T_1 et T_2 sans frottement entre eux, on constate que leur température⁶ s'établit au bout d'un temps plus ou moins long à une valeur **commune T, intermédiaire entre T_1 et T_2** .

Ceci signifie que le corps le plus chaud s'est refroidi ; il a donc cédé de la chaleur. Le corps le plus froid s'est réchauffé ; il en a reçu ; la chaleur passe du corps chaud au corps froid en l'absence d'intervention extérieure. Ceci est une conséquence du deuxième principe de la Thermodynamique. En effet, si l'on imagine un système isolé constitué des deux corps, l'entropie de ce système (somme des entropies des deux corps) ne peut qu'augmenter :

$$dS = dS_1 + dS_2 = \frac{dQ_1}{T_1} + \frac{dQ_2}{T_2} \geq 0$$

Or, selon le premier principe de la Thermodynamique, le système étant isolé :

$$dQ = dQ_1 + dQ_2$$

On en déduit donc que

$$dQ_1.(T_2 - T_1) \geq 0$$

⁵ Dans le cas d'une phase simple, on peut écrire $\delta Q = C_v.dT + \ell.v.dV$ ou $\delta Q = C_p.dT + \eta.dp$

C_p est la capacité thermique à pression constante et C_v la capacité thermique à volume constant [J.mole⁻¹.K⁻¹]

⁶ La température est une grandeur d'état intensive

Si le corps 2 a une température supérieure au corps 1 ($T_2 > T_1$), alors dQ_1 est positif ce qui veut dire que le corps 1 reçoit de la chaleur. **En l'absence d'intervention extérieure, la chaleur passe toujours du corps chaud au corps froid.**

1.5. MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

On distingue **trois mécanismes** d'échange de chaleur entre milieux matériels :

1.5.1. CONDUCTION

C'est une transmission de chaleur **dans la masse d'un milieu matériel**, les zones chaudes cédant de la chaleur à celles qui le sont moins. C'est le cas lorsqu'on chauffe l'extrémité d'une barre.

Au plan corpusculaire, l'interprétation est la suivante : une zone chaude est occupée par des particules à vitesse élevée, par définition même de la température. Le mouvement brownien fait constamment passer des particules d'une zone à l'autre ; mais entre zones à températures inégales, les particules ont des énergies cinétiques différentes ; le brassage a pour effet de transférer de l'énergie cinétique d'agitation, des zones chaudes vers celles qui le sont moins. La manifestation macroscopique en est un transfert de chaleur. C'est donc un **mécanisme de chocs** qui intervient.

1.5.2. RAYONNEMENT

C'est une **transmission d'énergie à distance**, entre deux corps séparés ou non par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur). C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. L'interprétation physique est la suivante : tout corps émet des particules désignées par "photons"; ceux-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur "longueur d'onde".

Un corps C émettant des photons dans toutes les directions possibles, certains d'entre eux sont reçus par l'autre corps C' et éventuellement absorbés, en tout ou partie. Bien entendu, le corps C' émet aussi des photons dont certains seront reçus et absorbés par C. Le bilan net se traduit par un échange d'énergie entre C et C'.

1.5.3. CONVECTION

C'est le phénomène observé entre un fluide en mouvement et une paroi, phénomène principal dans la plupart des échangeurs de chaleur.

La cause profonde est encore une **agitation des particules fluides**, mais à une échelle beaucoup moins microscopique. Les parcelles de matière au contact de la paroi (chaude par exemple) s'échauffent par conduction ; le mouvement du fluide reporte ces parcelles dans la masse où elles cèdent par mélange une partie de la chaleur reçue ; d'autres les remplacent à la paroi et ainsi de suite.

Quant au mouvement du fluide, il peut avoir deux causes. Ou bien il est imposé de l'extérieur par une machine (pompe, ventilateur, compresseur) ; c'est la **convection forcée**. Ou bien le contact du fluide avec la paroi plus chaude ou plus froide crée des différences de masse volumique, génératrices de mouvement au sein du fluide ; c'est la **convection naturelle**.

Rigoureusement, même en convection forcée, les différences de densité créent un écoulement parasite, en général insignifiant par rapport à l'écoulement principal. On parle de **convection mixte** quand les 2 phénomènes ont de l'importance.

Les trois mécanismes de transfert de la chaleur sont :

La conduction : transfert dans la masse.

Le rayonnement : transfert à distance d'autant plus important que la température est élevée.

La convection : transfert par transport.

A cela, il faut ajouter **le changement d'état** qui dissipe ou absorbe de la chaleur

1.5.4. EXEMPLE FAMILIER DES MECANISMES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Les mécanismes précédents nous sont familiers puisqu'ils sont tous les trois mis en œuvre dans la thermique du corps humain.

L'homme est un "homéotherme" ; son système de régulation thermique cherche à maintenir la température interne à 37,7°C. Les ressources d'énergie proviennent de la nourriture absorbée ; cette énergie étant utilisée pour différentes tâches :

- Travail chimique d'élaboration de molécules
- Travail osmotique pour l'oxygénation du sang
- Travail mécanique

Le métabolisme total \dot{M} [W] est ainsi dissipé en puissance mécanique \dot{W} et en chaleur \dot{Q} .

$$\frac{dU}{dt} = \dot{M} = \dot{W} + \dot{Q}$$

Le rendement mécanique est de l'ordre de 25%. Soit $\frac{\dot{W}}{\dot{Q}} = 0,25$.

L'ordre de grandeur de \dot{Q} est **150 W** (pour un individu de 80 kg), mais cette puissance dissipée augmente naturellement avec le travail mécanique, le rendement restant sensiblement constant. Comment cette chaleur est elle évacuée ? Par les trois modes de transfert : conduction (K), convection (C) et rayonnement (R) et par des changements d'état : évaporation d'eau (E).

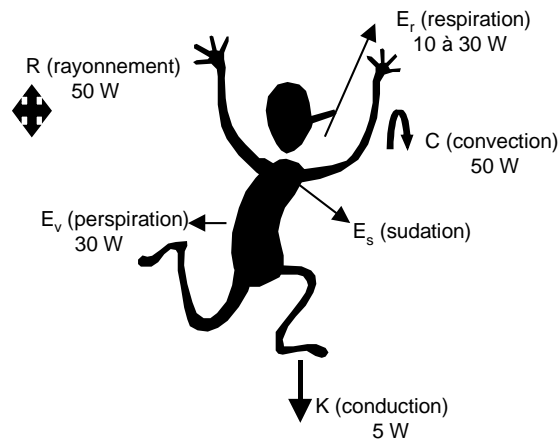
La conduction K intervient là où le corps est en contact avec un autre solide, au niveau des pieds par exemple. C'est donc un terme faible (vue la surface en contact), en général de l'ordre de 5 W (évidemment plus important chez un sujet couché).

La convection naturelle C provoque une élévation de température de l'air qui s'élève à proximité d'un individu. Elle intervient pour 50 W environ.

Le rayonnement R est du même ordre de grandeur : 50 W. Le rayonnement net (chaleur émise - chaleur absorbée) est donc important bien que la température du corps soit basse, du fait que la surface d'échange est d'environ $1,85 \text{ m}^2$.

Un individu est donc **autant** sensible à la température de l'air (convection) qu'aux échanges par rayonnement. On ressent donc fortement la proximité de surfaces froides (fenêtres en hiver) ou chaudes (paroi d'un four). En première approximation, on considère que le corps est sensible à la moyenne arithmétique de la température d'air et de la température moyenne des surfaces environnantes.

Pour se protéger du froid ou du chaud, on limite donc les échanges convectifs (grâce à des vêtements isolants) ou les échanges radiatifs (couverture de survie métallisée, combinaison de vulcanologue).



L'évaporation d'eau est un moyen d'évacuer la chaleur supplémentaire. Un individu évacue environ 2,5 kg d'eau par jour. Ces échanges se font par :

- la respiration (E_r) transfère par transport avec variation de l'enthalpie de l'air humide entre inspiration et expiration ; elle combine de la convection forcée et de l'évaporation, environ 10 à 30 W ;
- l'évaporation par la peau ou perspiration (E_v), environ 30 W ;
- la sudation (E_s) qui intervient en ultime recours, c'est à dire quand les autres mécanismes ne suffisent plus pour maintenir la température de $37,7 \text{ °C}$. Elle peut permettre de dissiper une chaleur de 1100 W. La mouillure traduit l'insuffisance de la surface d'échange à assurer une évaporation complète.

Le bilan thermique du corps s'écrit donc :

$$\dot{Q} = \dot{M} - \dot{W} = K + C + R + E_r + E_v + E_s$$

En cas de grand froid, le corps peut même générer de la chaleur par influx électriques : mécanisme du frisson.

1.6. EXEMPLES CONCRETS DE PROBLEMES THERMIQUES

Les transferts thermiques ont des applications dans tout le champ des activités industrielles, dès que de l'énergie est mise en jeu, sous quelque forme que ce soit : thermique bien sûr, mais aussi mécanique, électromagnétique ou radiative, nucléaire, électronique ou chimique ... L'objet de la discipline est l'étude et la maîtrise des transferts de toutes ces formes d'énergie, qui se dégradent en grande partie en énergie thermique. Il est fréquent que les transferts thermiques ne soient pas l'objectif de la conception d'un appareillage mais qu'ils interviennent comme contrainte à respecter : éviter des points chauds ou froids, limiter des dilatations, contrôler des transformations...

Citons quelques domaines :

Transports terrestres et aéronautiques

Véhicule thermique - refroidissement des principaux organes du moteur, contrôle thermique de la catalyse (un pot catalytique n'est efficace qu'à partir de 350°C environ), refroidissement des freins.

Un moteur automobile a un rendement de l'ordre de 28 %. Pour une automobile développant 86 kW sur l'arbre des roues, il faut donc évacuer une puissance thermique de 307 kW. En fait, une grande partie de cette puissance part dans les gaz d'échappement, et une étude des pertes montre que l'eau de refroidissement du moteur évacue environ 90 kW.

Pour maintenir l'eau à température constante, il faut la refroidir à son tour par l'air ambiant, à l'aide du "**radiateur**". C'est un échangeur extrêmement compact, ce que l'on conçoit pleinement lorsqu'on sait que le chauffage d'une maison individuelle exige entre 8 et 20 kW, suivant ses dimensions et son degré d'isolation thermique. Le radiateur d'une automobile fonctionnant à pleine puissance pourrait donc chauffer de quatre à dix pavillons moyens .

Freinage : imaginons un camion d'une masse totale de 15 tonnes, descendant à 50 km/h une rampe inclinée à 6 %; la puissance fournie par son poids vaut :

$$(15\ 000 \times 9,81) \times (50\ 000 / 3\ 600) \times 0,06 = 122\ 500\ \text{W}$$

Même en tenant compte du fait que le moteur fonctionne alors en retardateur, il reste une puissance considérable à évacuer par des "freins" qui peuvent être, soit à friction, soit électromagnétiques (les deux étant en général combinés). Le problème consiste à **s'assurer que les organes de freinage conservent des températures modérées**, faute de quoi les surfaces frottantes perdraient leurs qualités, et les pièces magnétiques, dépassant le "point de Curie", perdraient leurs propriétés d'aimantation.

Véhicule électrique - contrôle thermique du moteur, de l'électronique, de la batterie, intégration des boucles fluides (le chauffage de l'habitacle d'une voiture électrique pose un problème particulier).

Thermique de l'habitacle automobile: vitrages performants (limitant les surchauffes d'été), propriétés radiatives des revêtements de siège, climatisation et confort thermique.

Turbo - réacteur

Les moteurs d'avion ont un rendement d'autant plus élevé que les gaz de combustion entrent chauds dans le corps de la turbine. On pourrait donc imaginer augmenter encore

leur température. La limitation provient des contraintes acceptables par les matériaux constituant les aubages. Ceci impose un **refroidissement local des aubages** réalisé en soufflant un film d'air froid sur leur surface.

Le collage de matériaux composites impose des vitesses de montée en température bien contrôlées.

Industries électroniques

La miniaturisation des composants se traduit par un accroissement de la densité de *puissance dissipée dans les puces électroniques*. Il faut donc reconsidérer les technologies de refroidissement à utiliser. Le recours à des matériaux et **dispositifs propres à évacuer la chaleur** (ailettes en particulier) génèrent d'autres problèmes thermiques : conduction thermique lors du *brasage des composants sur les supports* ; la température ne devant pas dépasser 320°C.

Chimie et agroalimentaire - maintien en température des réacteurs

Réaction chimique

Si la réaction est **endothermique** (fours à chaux, fours à ciment), il faut **fournir de la chaleur** aux minerais entrant en réaction. Si N est le nombre de moles transformées par unité de temps, et L la chaleur molaire de réaction, le flux thermique minimal pour maintenir la température constante vaut $N.L$. Si la réaction est **exothermique** (synthèse de l'ammoniac) ou si la température doit être contrôlée (gazéification du charbon), il s'agit au contraire d'**évacuer la chaleur** produite, de telle sorte que la température ne s'élève pas à l'intérieur du réacteur.

Energie

Production d'énergie thermique (brûleurs, foyers, chaudières...). La thermique influence non seulement le rendement de ces appareils mais aussi les *émissions de polluants* (exemple température de flamme et production de NOx). Dans une chaudière, on veut vaporiser un certain débit massique \dot{M} d'eau à une température donnée T . La puissance à fournir au liquide est par conséquent $\Phi = \dot{M}L$. L désignant la chaleur latente [J/kg] de vaporisation à la température T . La conception du générateur de vapeur consiste à produire le débit de vapeur imposé avec l'installation la plus économique possible, en prenant garde toutefois de **limiter en tout point la température à un niveau admissible** par le métal.

La production décentralisée d'énergie électrique par des petites unités conduit à rechercher des **échangeurs de chaleur compacts**. D'autre part, le rendement des turbines à combustion s'améliorant en aspirant de l'air le plus froid possible, on a recours dans les pays chauds à des **stockages de "froid"**.

Les quelques exemples précédents illustrent que l'ingénieur doit **concevoir** des surfaces d'échange, **arbitrer** entre consommations d'énergie et coûts d'investissement, prendre en compte les **contraintes thermiques**, **contrôler** des températures et des puissances échangées.