



L'énergétique pour les nuls !

D. LEDUCQ
Cemagref

Notion de chaleur

Confusion entre chaleur et température

⇒ ~1750 : La chaleur en tant que fluide (phlogistique)

- les matériaux contiennent du phlogiston
 - substance incolore, inodore qui est séparée du corps lors de la combustion

1750-1760 : Black, Lavoisier, Laplace : notion de chaleur "le calorique"

1798 : Thompson montre qu'il ne peut s'agir de matière (forage de canons)

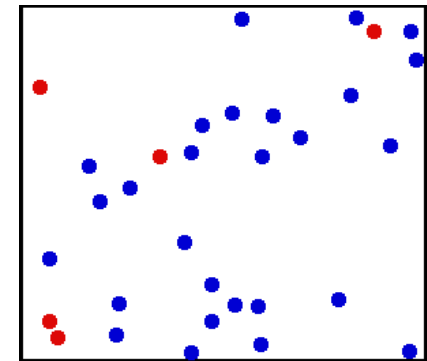
- travail transformé en chaleur



Benjamin Thompson
(1753-1814)

Interprétation statistique de la chaleur

- 1860 : Maxwell, Boltzman
 - Théorie cinétique des gaz
- La chaleur est une mesure de l'agitation des molécules
 - Température : énergie moyenne d'une molécule
 - Chaleur : énergie totale obtenue par l'ensemble du mouvement des molécules



Notion de réversibilité

- Le problème de la chaleur
 - se transmet d'un corps chaud vers un corps froid
 - Principe de Clausius
 - on obtient facilement de la chaleur à partir d'un travail (frottement)

- Phénomènes réversibles et irréversibles
 - Mécanique de Newton : tout est réversible
 - Flèche du temps



La thermodynamique

Point de départ : la machine à vapeur (1769 : Watt)

- chaleur transformée en travail (partiellement)

1824 : Carnot : analyse de l'efficacité des machines à vapeur

- travail produit que si transport de chaleur d'un corps chaud vers un corps froid
- travail maximal si transformation réversible
- travail indépendant du fluide

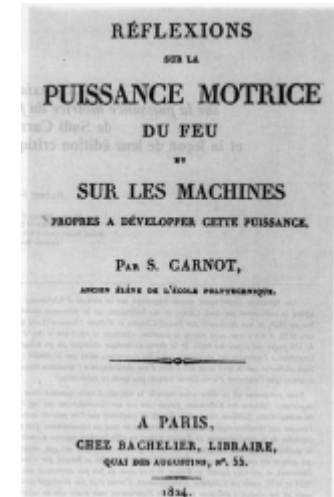
1842 : Mayer-Joule

- équivalence entre travail et chaleur (1^{er} principe)

1850 : Clausius (2nd principe, entropie)



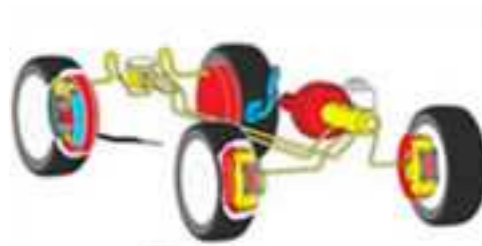
Sadi Carnot (1796-1832)



Premier et second principe

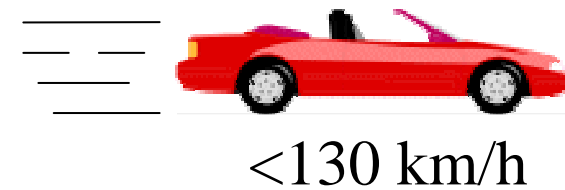


Premier
principe
⇒



Récupération
de l'énergie dissipée

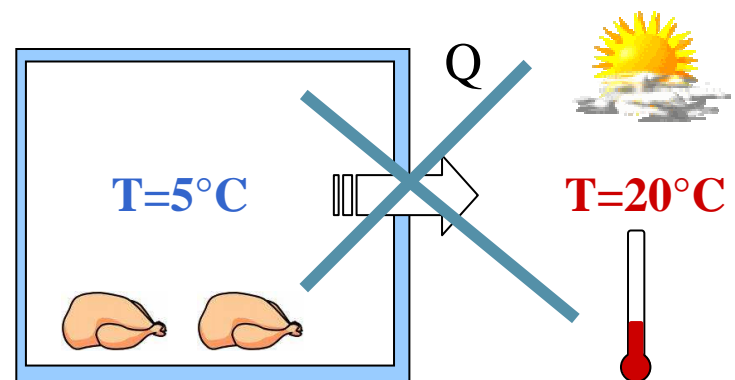
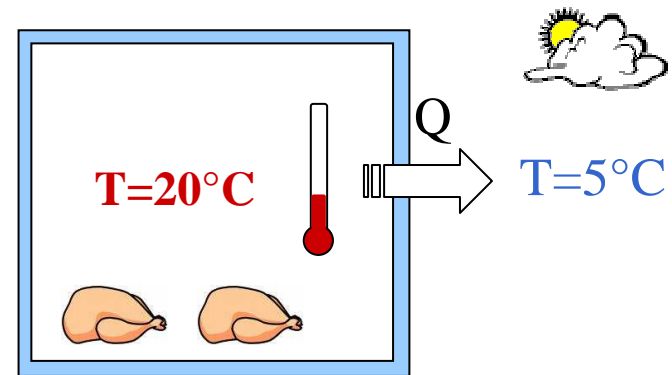
Second
principe
⇒
Irréversibilité



Les 2 principes de la thermodynamique appliqués au froid

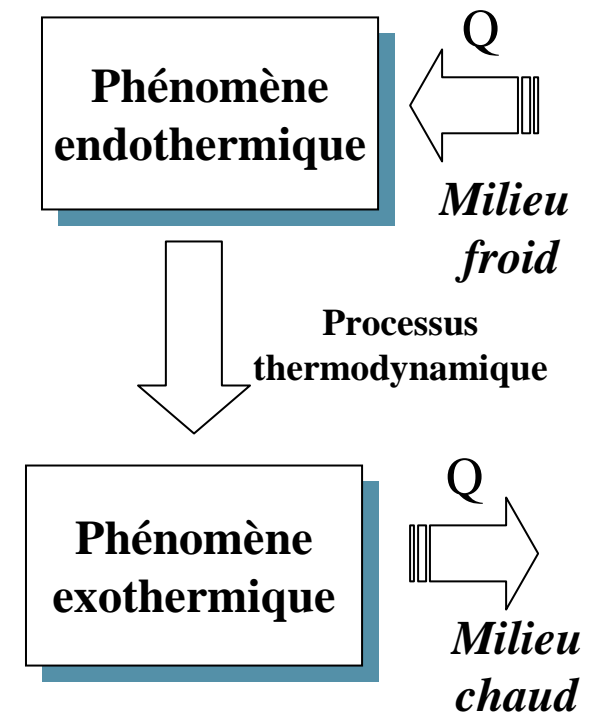
Comment refroidir un local?

- Premier principe : il faut « retirer » de la chaleur au milieu à refroidir et la céder à un autre milieu
 - Il s'agit d'un **transport** de chaleur
- Second principe : ce transport de chaleur d'une source froide vers une source chaude ne peut se faire naturellement (principe de Clausius)
- Ce transport nécessite au moins **deux** sources de chaleur et l'apport d'une **énergie supplémentaire**



Transport de chaleur d'une source froide vers une source chaude

- Pour transporter de la chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à température plus élevée, il faut :
 - Un phénomène endothermique (qui absorbe de la chaleur au milieu froid)
 - Un processus thermodynamique pour passer du milieu froid au milieu chaud
 - Un phénomène exothermique (pour rejeter la chaleur au milieu chaud)





Phénomènes endothermiques

- Vaporisation d'un liquide (liquide \Rightarrow gaz)
- Fusion d'un solide (solide \Rightarrow liquide)
- Sublimation d'un solide (solide \Rightarrow gaz)
- Détente d'un gaz (dans certaines conditions)
- Effet Peltier
- Dissolution d'un soluté dans un solvant
- Désaimantation d'un métal paramagnétique
- Désorption d'un gaz ou d'une vapeur
- Etc...

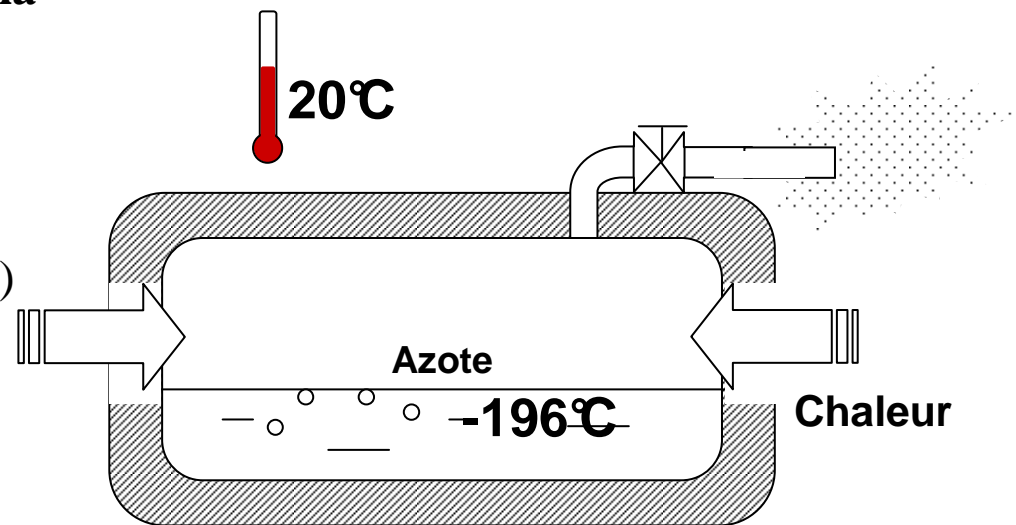
Evaporation d'un liquide

Pour qu'un liquide puisse s'évaporer, il faut lui **apporter de la chaleur**

Si on lui apporte de la chaleur, le liquide s'évapore et la pression évolue jusqu'à la pression d'équilibre (*pression de saturation*)

Au départ, la bouteille est isolée
On ouvre la vanne => pas d'ébullition

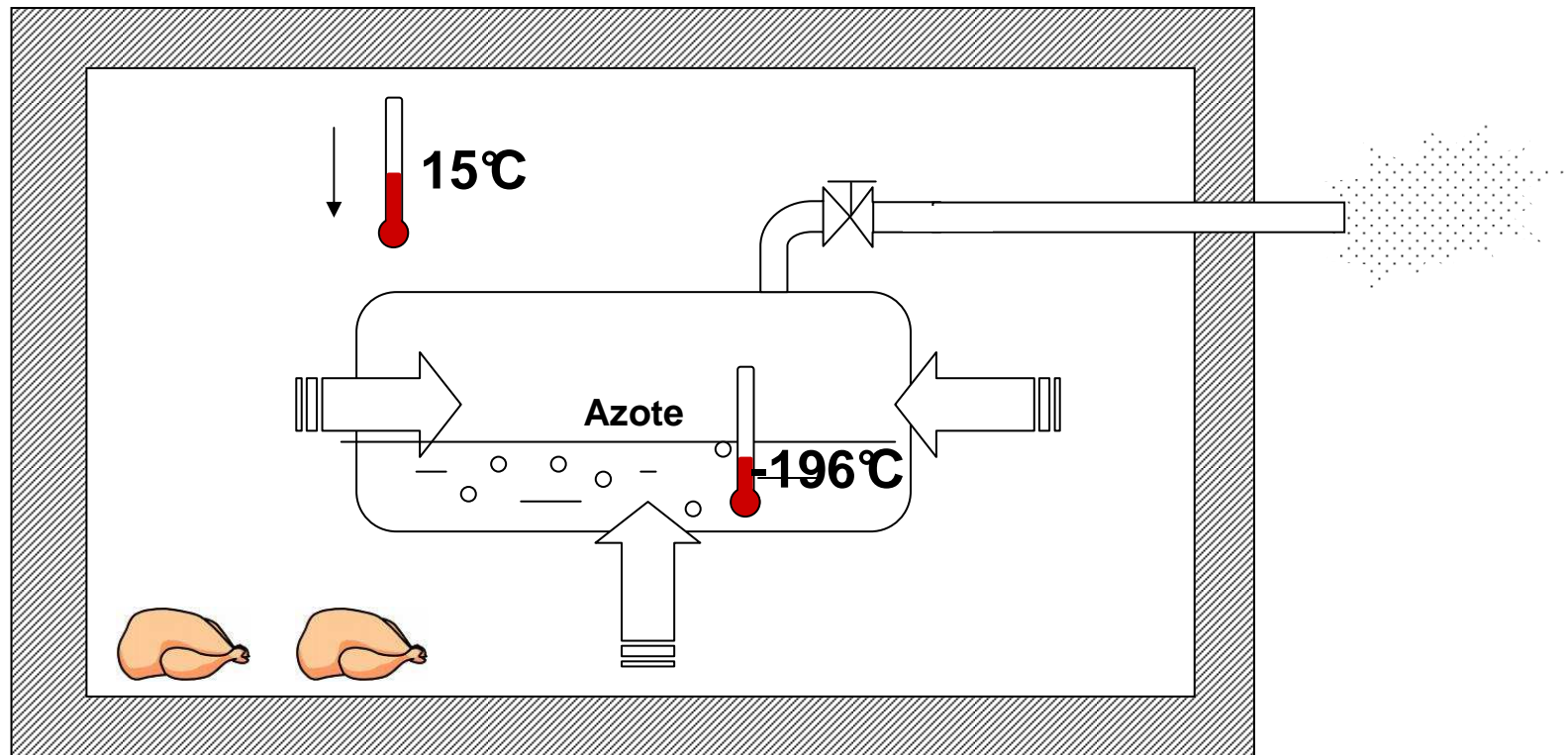
On retire une partie de l'isolation
Le liquide s'évapore progressivement



Il y a **ébullition** du fluide
la température dans la bouteille est de -179°C
La température des parois non isolées est proche de -179°C

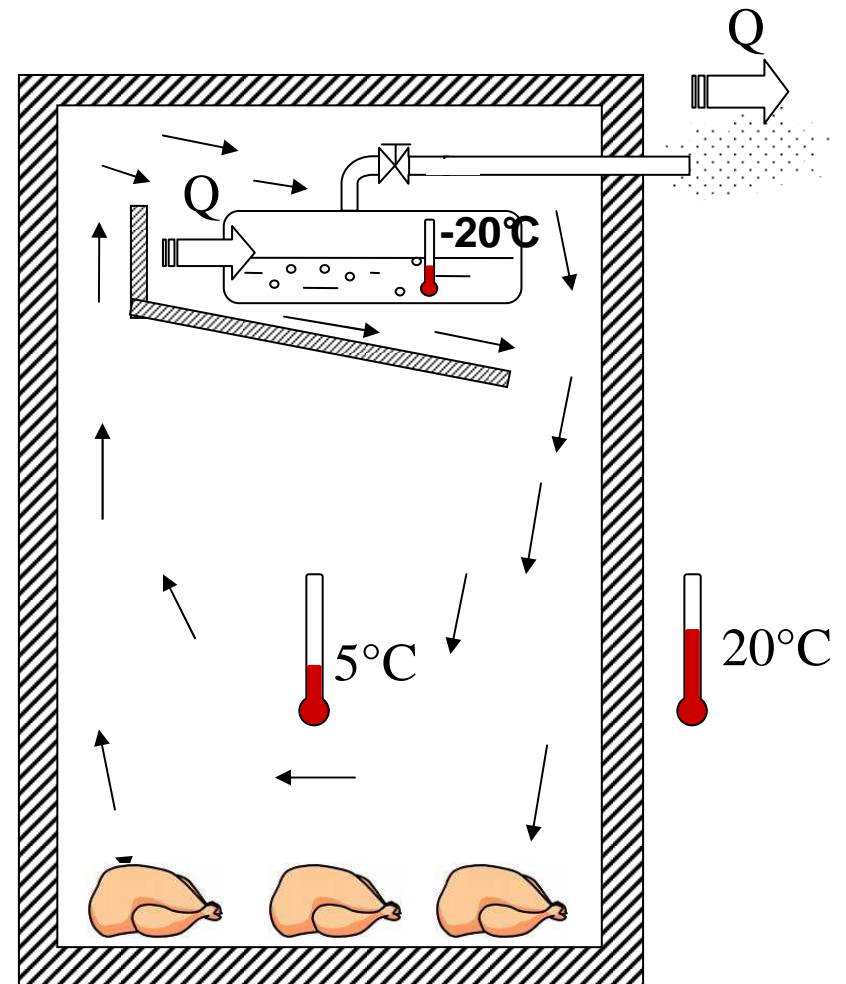
Evaporation d'un liquide dans une enceinte calorifugée

- La température de l'enceinte diminue : la chaleur de l'enceinte est évacuée vers l'extérieur



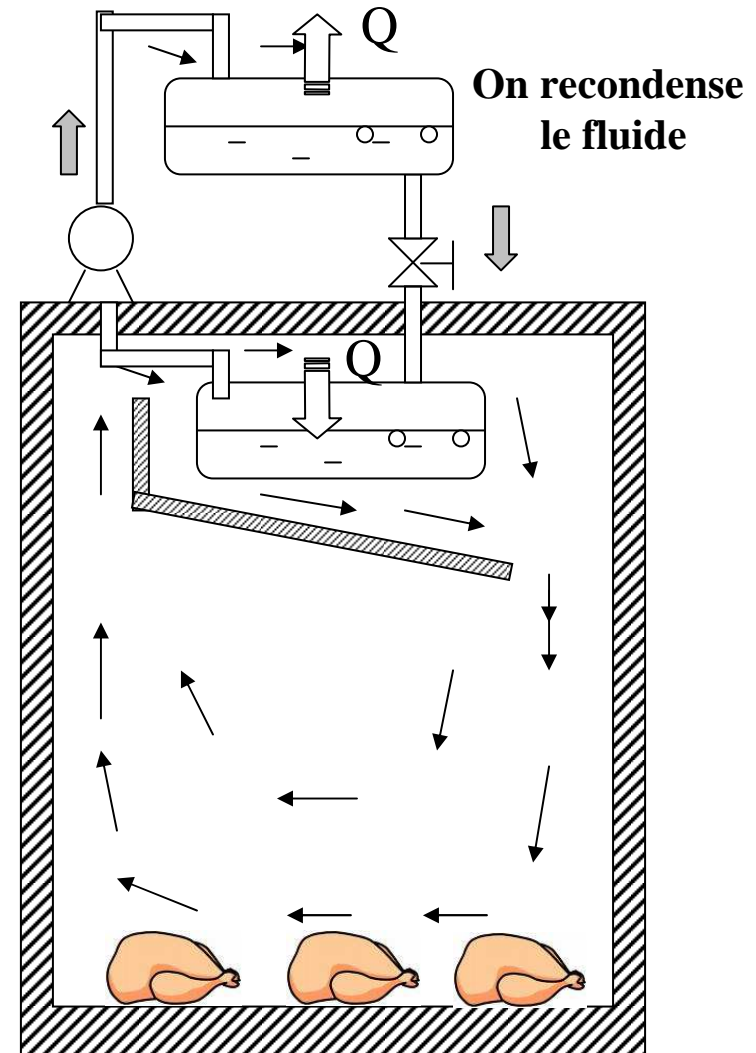
Réfrigération par évaporation en cycle ouvert

- On libère progressivement le fluide
- De l'air est ventilé en permanence autour du réservoir
- La pression baisse
- L'air en contact avec le réservoir apporte de la chaleur et provoque l'ébullition du liquide
- La pression remonte jusqu'à la pression d'équilibre (pression de saturation)
- Inconvénient : ne fonctionne que tant qu'il y a du liquide dans le réservoir



Réfrigération par évaporation en continu

- Le fluide est évaporé à basse pression dans l'évaporateur
- La pression est augmentée par compression
- Le fluide est condensé à haute pression dans le condenseur
- On passe de la haute pression à la basse pression en détendant le fluide
- Et on recommence...



Efficacité du cycle à compression de vapeur

■ Efficacité théorique

- COP=ce que l'on récupère/ce que l'on fournit
- COP=Puissance frigorifique/Puissance électrique

- Efficacité de Carnot : $COP_{Carnot} = \frac{T_0}{T_k - T_0}$

- Pour un cycle avec des températures de sources de +5°C et +20°C, l'efficacité devrait être de

$$COP_{Carnot} = \frac{278}{293 - 278} = 18,6$$

■ Efficacité réelle

- Pour un cycle à compression de vapeur avec des échangeurs air/air, le COP réel est en moyenne de l'ordre de 2 à 3
- Avec des échangeurs eau/eau, le COP est de 3 à 4

Pourquoi cette différence?

Pourquoi le cycle réel n'est pas un cycle idéal?

Cycle quasi-idéal	Cycle réel
Compression <u>isentropique</u>	Compression non isentropique de vapeurs surchauffées, dissipation visqueuse, frottements mécaniques, non équilibre entre fluide et paroi
Condensation <u>isotherme</u>	Désurchauffe des vapeurs, puis condensation isotherme (fluides purs), puis sous-refroidissement
Pincement échangeurs infiniment petit	Pincement échangeurs de plusieurs degrés
Détente <u>isentropique</u> avec récupération de l'énergie mécanique	Détente isenthalpique par « laminage » du fluide
Evaporation <u>isotherme</u>	Evaporation isotherme, puis surchauffe des vapeurs
Pas de pertes de charges	Pertes de charges dans les échangeurs et les tuyauteries



Des voies d'amélioration

- Améliorer l'efficacité des échangeurs
 - Surface plus grande
 - Echanges plus efficaces
 - Réduire le « pincement »

- Autres voies
 - Récupérer l'énergie lors de la détente
 - Améliorer l'efficacité de la compression
 - Conduite de l'installation (contrôle, stockage...)
 -

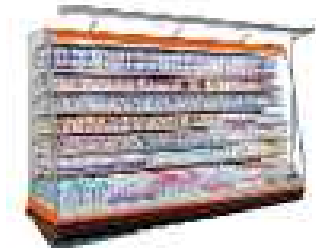
- Systèmes alternatifs de production du froid

Ce que propose SIMPFRI

- Conduite de l'installation
 - Anticiper la demande (contrôle prédictif)
 - Maintenir à tout instant le « réglage » optimal des différents éléments
- Minimiser la demande en froid
 - Réorganisation d'un espace de meuble de vente
- Mise en œuvre du stockage de froid
 - Matériau à changement de phase



www.matal.fr



www.bonnet-neve.com



www.bosh-electromenager.com





Des contraintes fortes

- Impact sur l'environnement
 - Couche d'ozone
 - Effet de serre
- Sécurité
 - Inflammabilité, toxicité

Cycle ditherme réversible

- On transporte la chaleur Q_0 de la source d'un milieu plus froid à T_0 vers un milieu plus chaud à T_k
- En application du [second principe](#) pour un cycle ditherme réversible, on sait que l'on aura :

$$\frac{Q_0}{T_0} + \frac{Q_k}{T_k} = 0 \Rightarrow |Q_k| = \left| -Q_0 \frac{T_k}{T_0} \right| > 1$$

☞ La chaleur Q_k est ainsi obligatoirement plus grande que la chaleur Q_0

- Or d'après le [premier principe](#), la somme des chaleurs échangées et des travaux doit être nulle pour un cycle réversible
 - Il est donc **nécessaire d'apporter le travail W** pour transporter la chaleur Q_0 de T_0 à T_k tel que :

$$Q_0 - Q_k + W = 0$$

