

# 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)

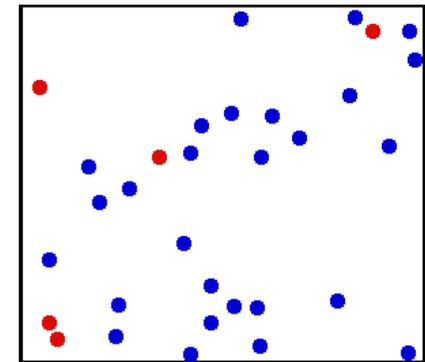
- travail transformé en chaleur



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

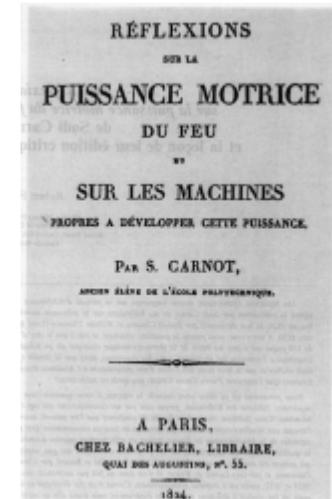
**1842 : Mayer-Joule**

- équivalence entre travail et chaleur (1<sup>er</sup> principe)

**1850 : Clausius (2<sup>nd</sup> principe, entropie)**



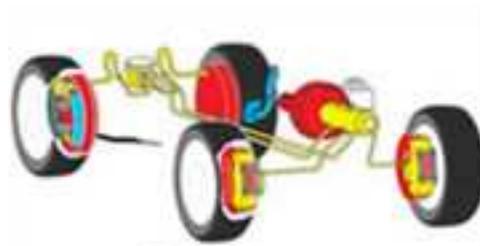
*Sadi Carnot (1796-1832)*



# Premier et second principe

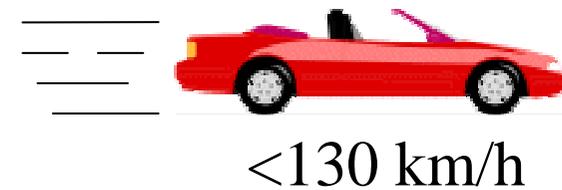


Premier  
principe  
⇒



Récupération  
de l'énergie dissipée

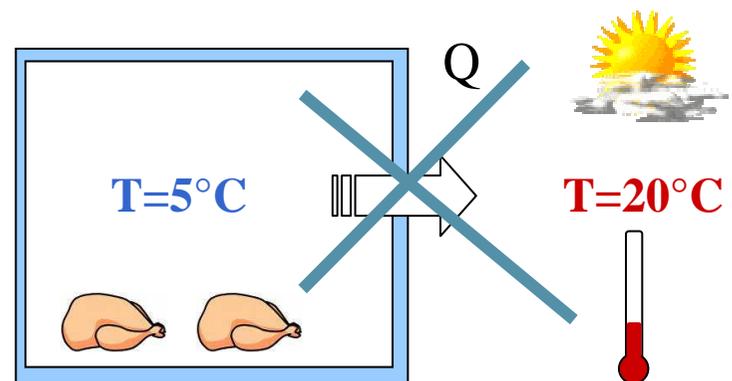
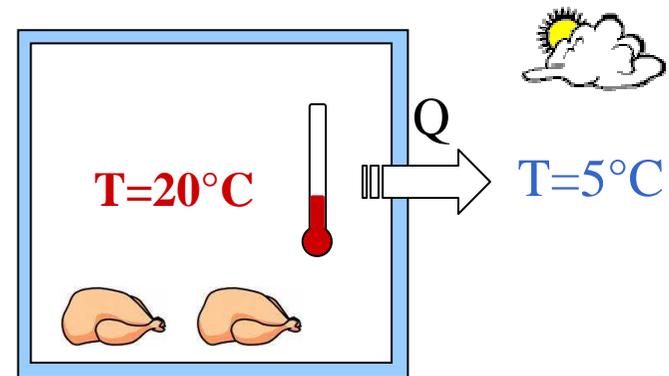
Second  
principe  
⇒  
Irréversibilité



# Les 2 principes de la thermodynamique appliqués au froid

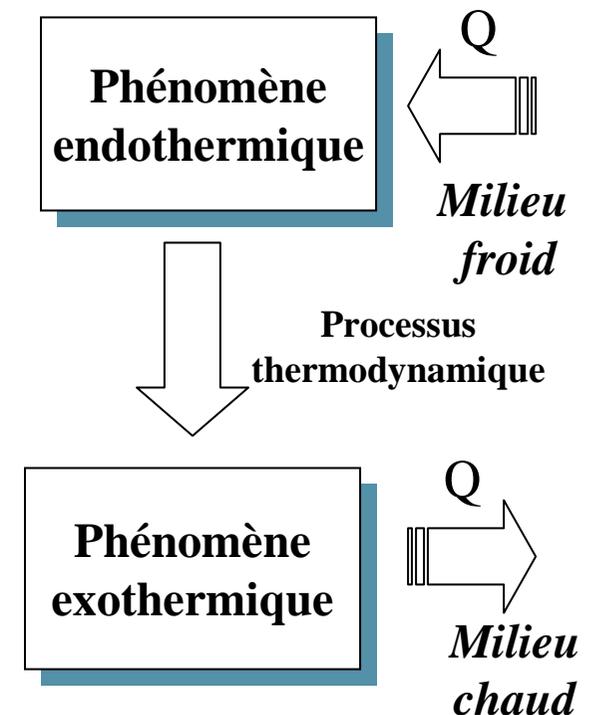
Comment refroidir un local?

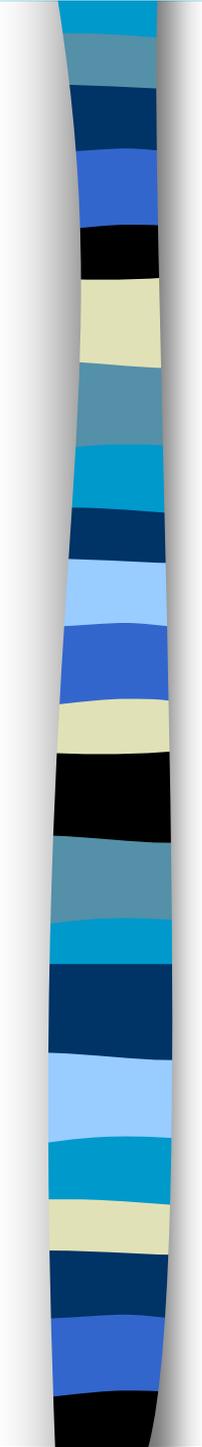
- Premier principe : il faut « retirer » de la chaleur au milieu à refroidir et la céder à un autre milieu
  - Il s'agit d'un **transport** de chaleur
- Second principe : ce transport de chaleur d'une source froide vers une source chaude ne peut se faire naturellement (principe de Clausius)
- Ce transport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

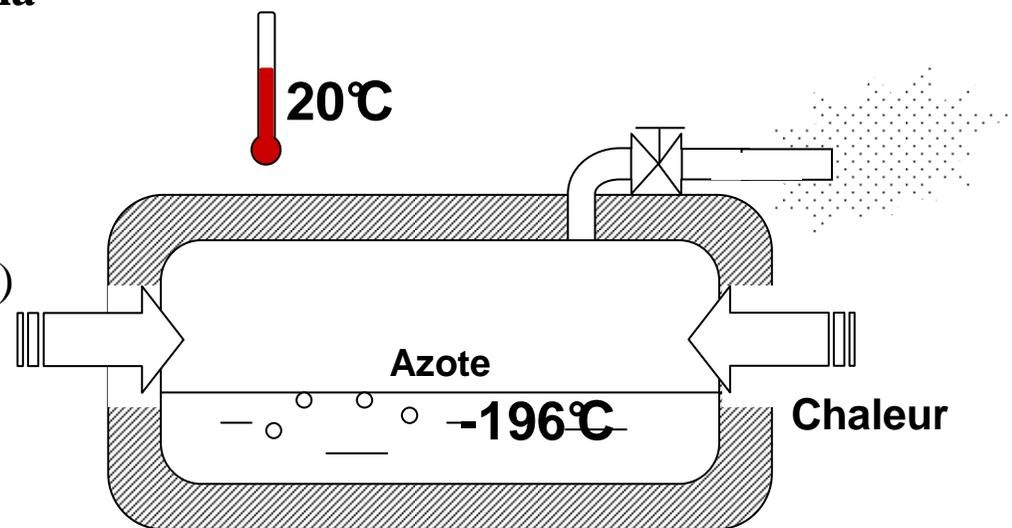
# Evaporation d'un liquide

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

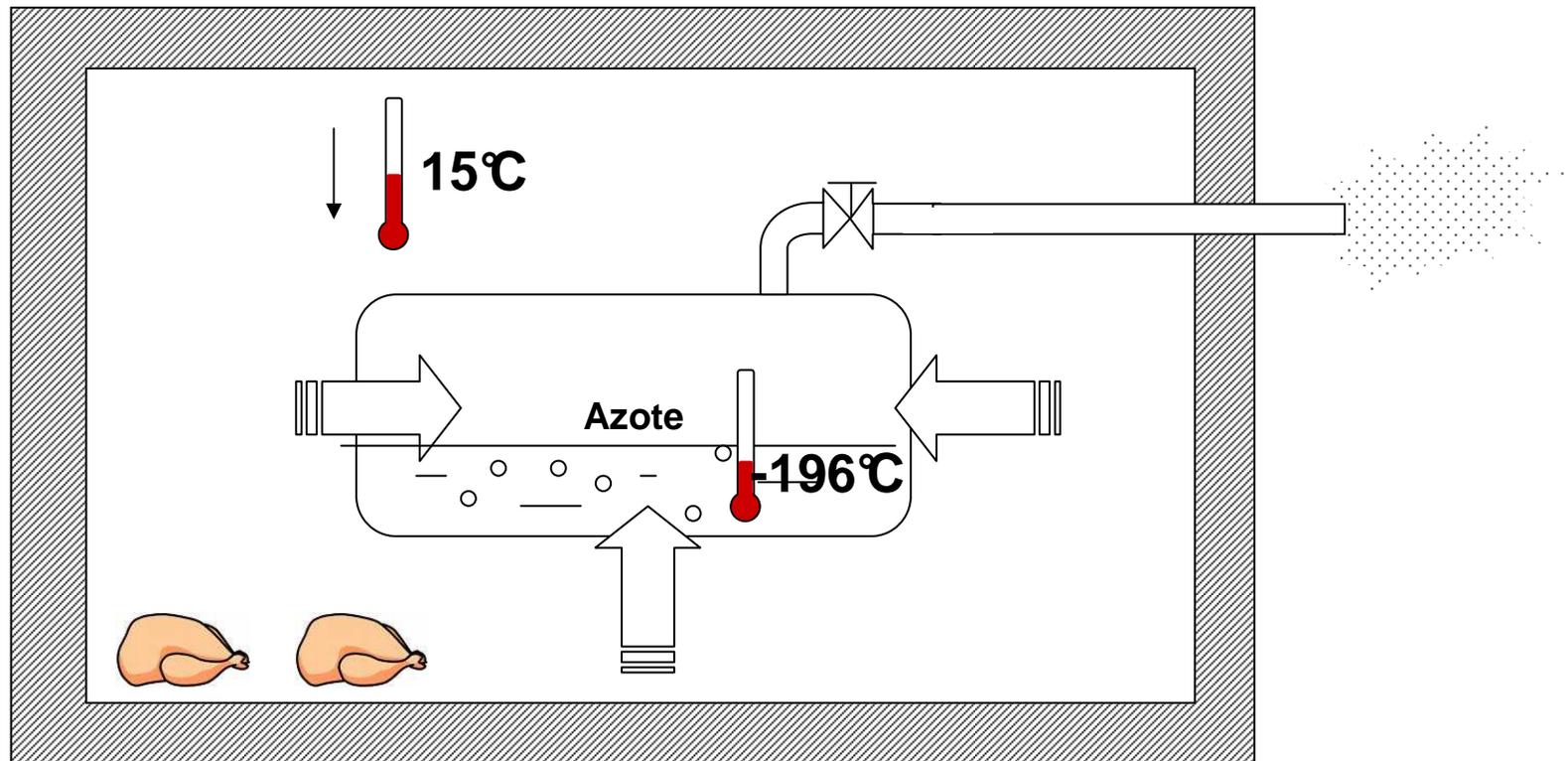
On retire une partie de l'isolation  
Le liquide s'évapore progressivement



Il y a **ébullition** du fluide  
la température dans la bouteille est de  $-179^{\circ}\text{C}$   
La température des parois non isolées est proche de  $-179^{\circ}\text{C}$

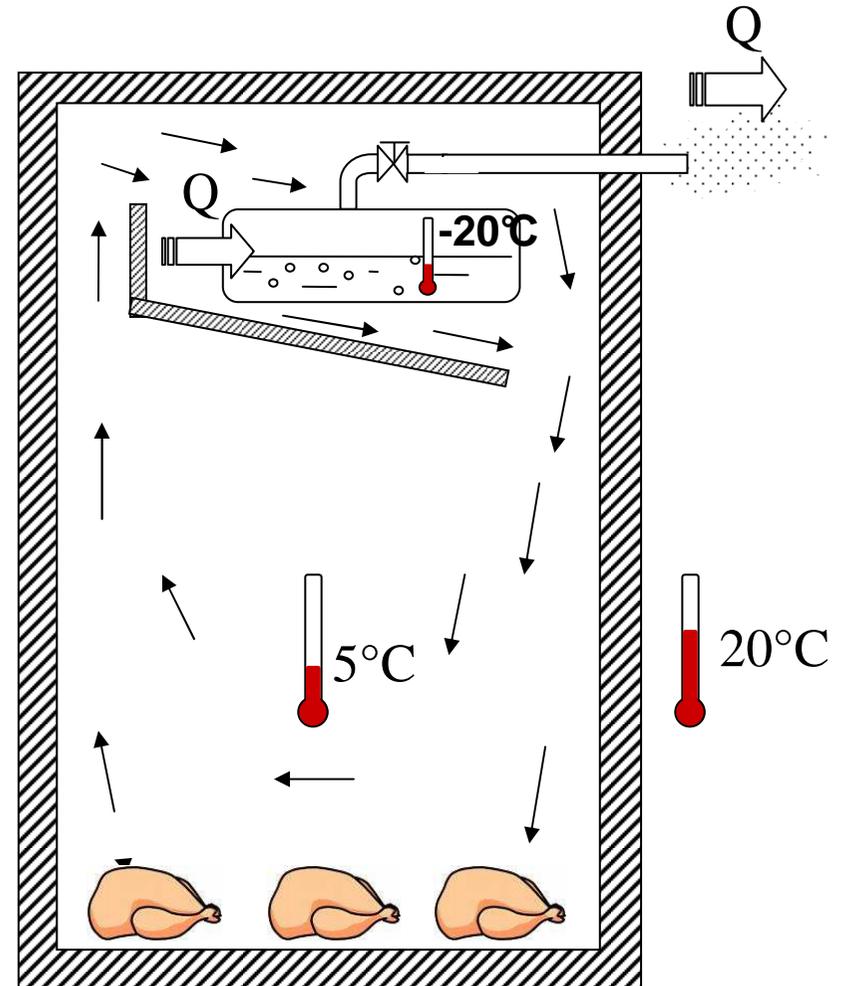
# Evaporation d'un liquide dans une enceinte calorifugée

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



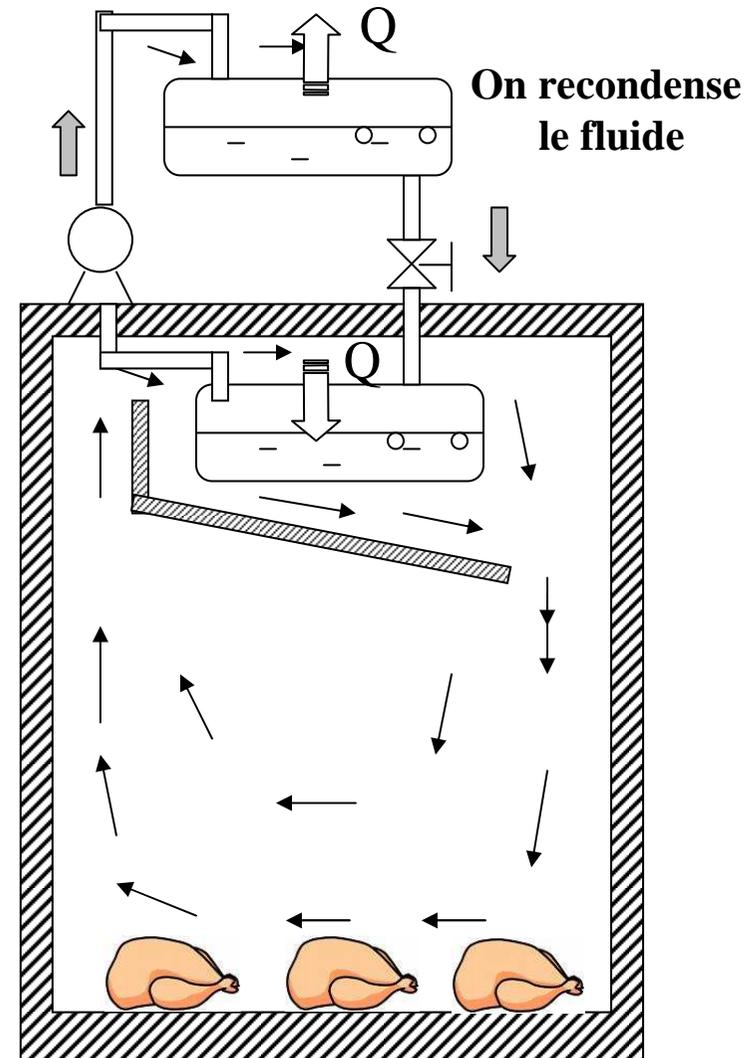
# Réfrigération par évaporation en cycle ouvert

- 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

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

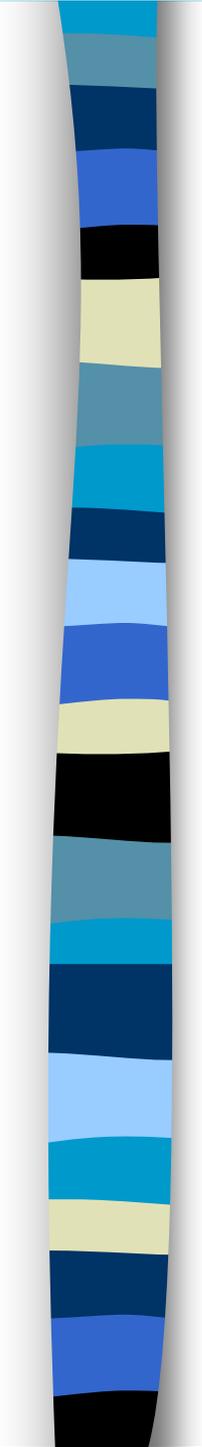
## ■ Efficacité réelle

- 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



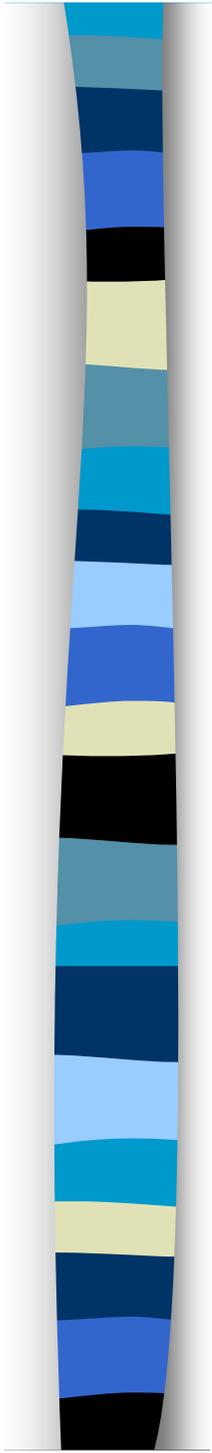
[www.matal.fr](http://www.matal.fr)

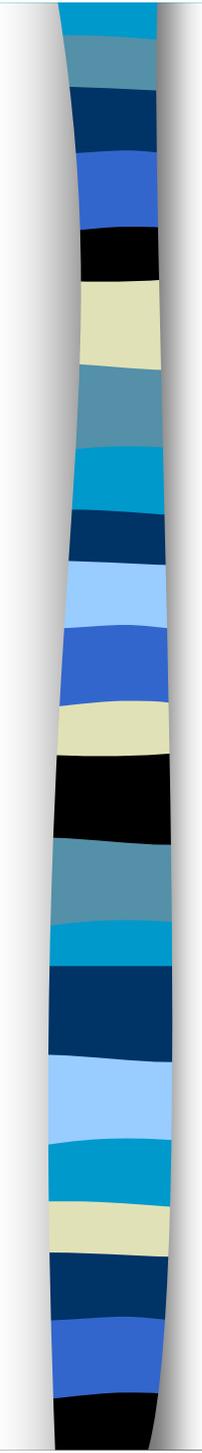


[www.bonnet-neve.com](http://www.bonnet-neve.com)



[www.bosh-electromenager.com](http://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 :

$$Q_0 - Q_k + W = 0$$

