Bases Techniques des Installations et Applications Frigorifiques

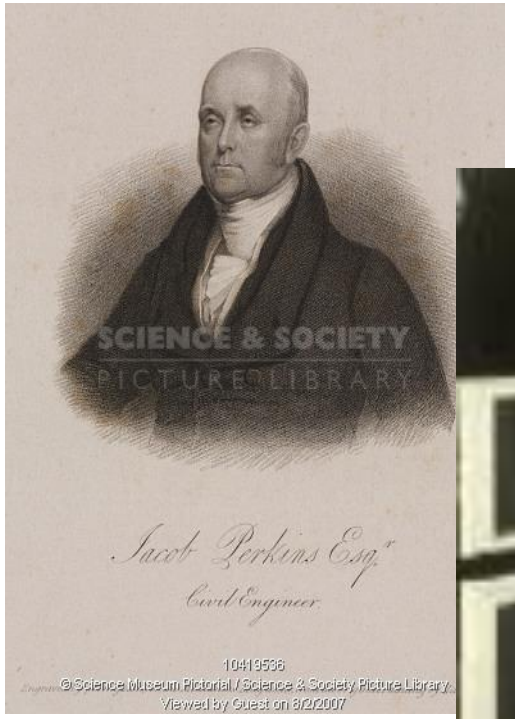
Osmann.sari@heig-vd.ch

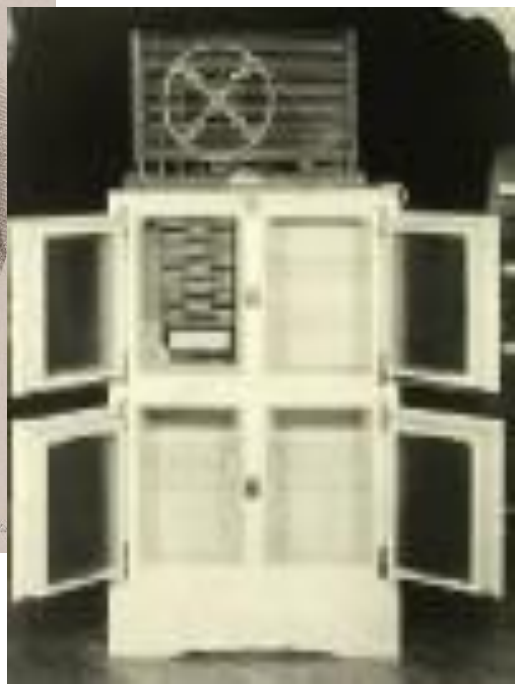
Le froid dans l'ancienne Rome

- **Rapports de Plinius:**
  - La neige transportée des Alpes à Rome a été employée par l'empereur Nero pour refroidir le vin

- **A Pompeji :**
  - Utilisation commune de la glace dans le manteau de refroidissement des coffrets à nourriture
  - Le mélange de neige naturelle et de sel refroidissait la crême glacée et le coulis de glace à une température de -15°C

Introduction





First domestic refrigerator was developed in 1834 by the American inventor Jacob Perkins

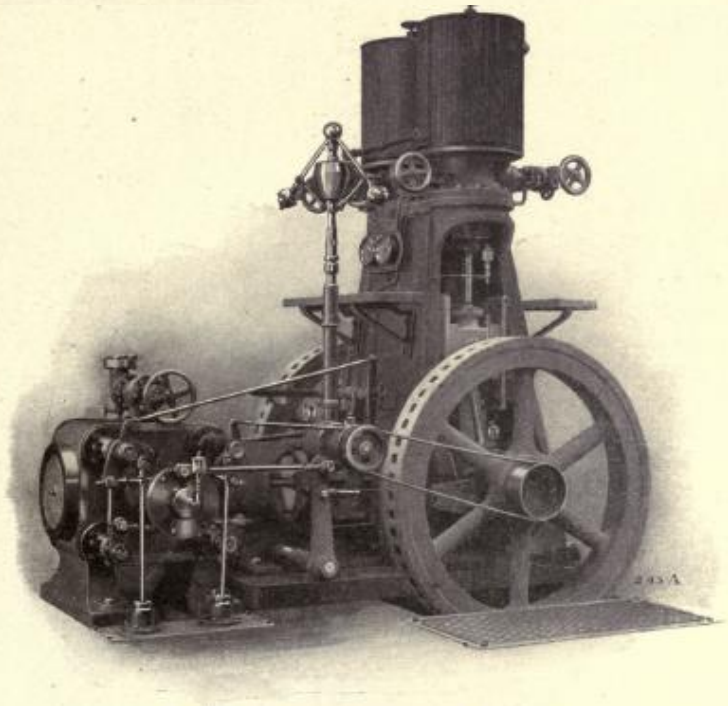
American School of Correspondence

American school of correspondence

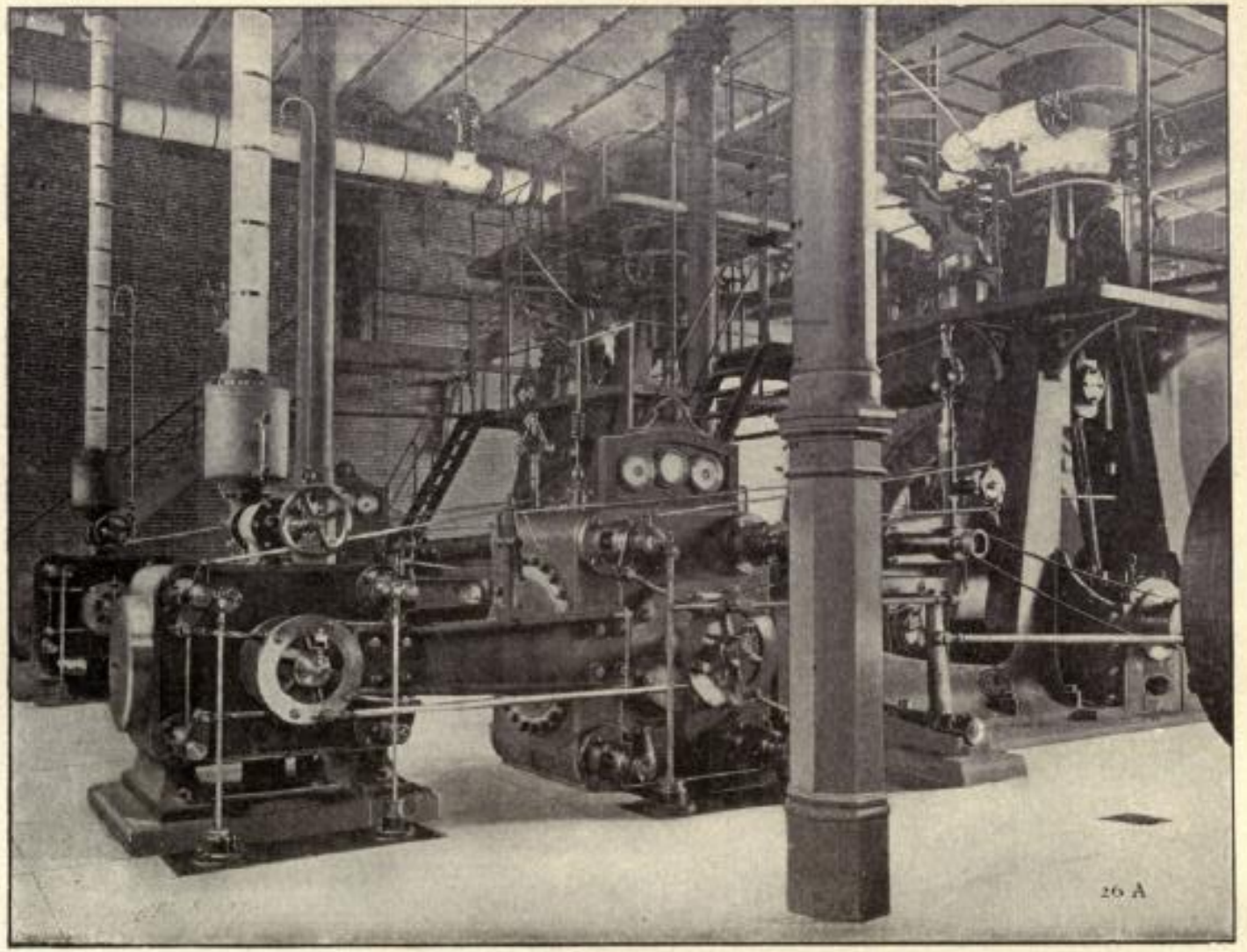
Refrigeration Ref

A Practical Treatise

ON THE SCIENTIFIC PRINCIPLES, MECHANICAL OPERATION, AND MANAGEMENT OF REFRIGERATING PLANTS BASED ON THE VARIOUS MODERN SYSTEMS OF ARTIFICIAL COOLING



15 TO 20 TON REFRIGERATING MACHINE.
Frick Company.



ENGINE ROOM ST. LOUIS REFRIGERATING AND COLD STORAGE CO.

Les cryo-aimants du LHC © CERN

e

La consommation de produits surgelés est supérieure à 50 kg par habitant aux États-Unis [30].

Novembre 2015 / 29e Note d'Information sur les technologies du froid

Le rôle du froid dans l'économie mondiale

L'IIF publie régulièrement des Notes d'Information à l'intention des décideurs du monde entier. Ces notes présentent une synthèse des connaissances sur des thèmes clés liés aux technologies du froid et à ses applications. Chaque note propose des axes de développement prioritaires pour l'avenir et expose les recommandations de l'IIF en ce sens.

L'IIF estime que le nombre total de systèmes de froid, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur en fonctionnement dans le monde s'élève à environ 3 milliards. Les ventes mondiales annuelles de ces équipements représentent un montant d'environ 300 milliards de dollars américains. Près de 12 millions de personnes dans le monde travaillent dans le secteur du froid, qui utilise environ 17% de l'électricité totale consommée au niveau mondial.

Les données statistiques présentées dans cette nouvelle Note d'Information illustrent l'importance du secteur du froid. Celle-ci devrait encore progresser dans les années à venir en raison de la croissance des besoins de froid dans de nombreux domaines et du réchauffement de la planète.

L'industrie du froid joue un rôle majeur et croissant dans l'économie mondiale, particulièrement dans les domaines de l'alimentation, de la santé, de l'énergie et de l'environnement et les décideurs doivent davantage le prendre en compte.

Cette Note d'Information a été préparée par Didier Coulomb (Directeur général de l'IIF), Jean-Luc Dupont (Chef du Département d'Information scientifique et technique) et Audrey Pichard (rédactrice de Notes d'Information), et a été revue par plusieurs experts des commissions de l'IIF.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID
www.iifir.org iif-iir@ iifir.org In #refrigeration
177, boulevard Malesherbes, 75017 PARIS – France
T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

Tableau 1 : *Nombre de systèmes frigorifiques en service dans le monde, par application*

Applications	Secteurs	Équipements	Nombre d'unités en service
Froid et alimentation (voir § 2.1.)	Froid domestique	Réfrigérateurs et congélateurs	1,5 milliards (1) (2)
	Froid commercial	Équipements de froid commercial (y compris unités de condensation, machines autonomes et systèmes centralisés)	90 millions (1) (2)
	Transport frigorifique	Véhicules frigorifiques (camionnettes, camions, semi-remorques ou remorques)	4 millions (3)
		Conteneurs frigorifiques (« reefers »)	1,2 millions (2)
Conditionnement d'air (voir § 2.2.)	Conditionneurs d'air fixes	Systèmes refroidis par air	600 millions (2) (4)
		Refroidisseurs d'eau	2,8 millions (2)
	Conditionneurs d'air mobiles	Véhicules climatisés (voitures particulières, véhicules commerciaux et bus)	700 millions (5)
Froid et santé (voir § 2.3.)	Médecine	Systèmes à imagerie par résonance magnétique (IRM)	25.000 (6)
Froid et industrie (voir § 2.4.)	Gaz Naturel Liquéfié (GNL)	Terminaux de réception de GNL	110 (7)
		Trains de liquéfaction	92 (7)
		Méthaniers	421 (7)
Pompes à chaleur (voir § 2.5.)		Pompes à chaleur (secteurs résidentiel, commercial et industriel, y compris les conditionneurs d'air air-air réversibles)	160 millions (8) (9)
Sports et loisirs (voir § 2.6.)		Patinoires	13.500 (10)

INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID
www.iifir.org iif-iir@ iifir.org #refrigeration
177, boulevard Malesherbes, 75017 PARIS – France
T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

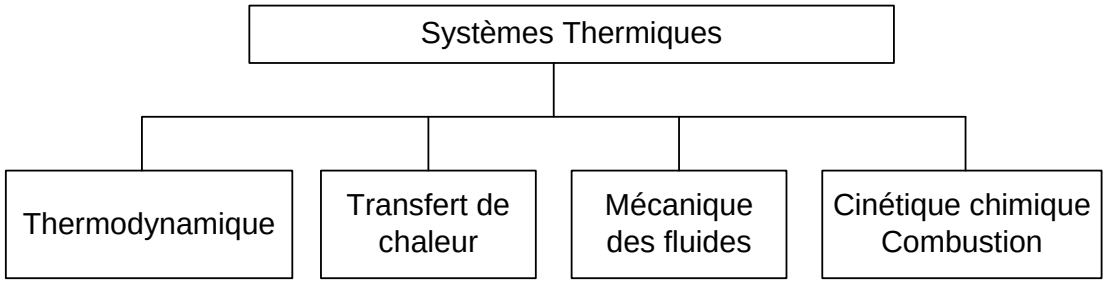
Système Thermique

- **Un système est constitué de plusieurs éléments combinés dans le but d'obtenir un résultat particulier.**

- **Par thermique**
  - **on peut entendre toute question dans laquelle la température joue un rôle.**

- **Les piliers de la thermique qui traitent principalement de l'action de la température sont :**
  - **La thermodynamique,**
  - **le transfert de chaleur et de masse,**
  - **la mécanique des fluides,**
  - **la mécanique appliquée**

Notions de Thermodynamique

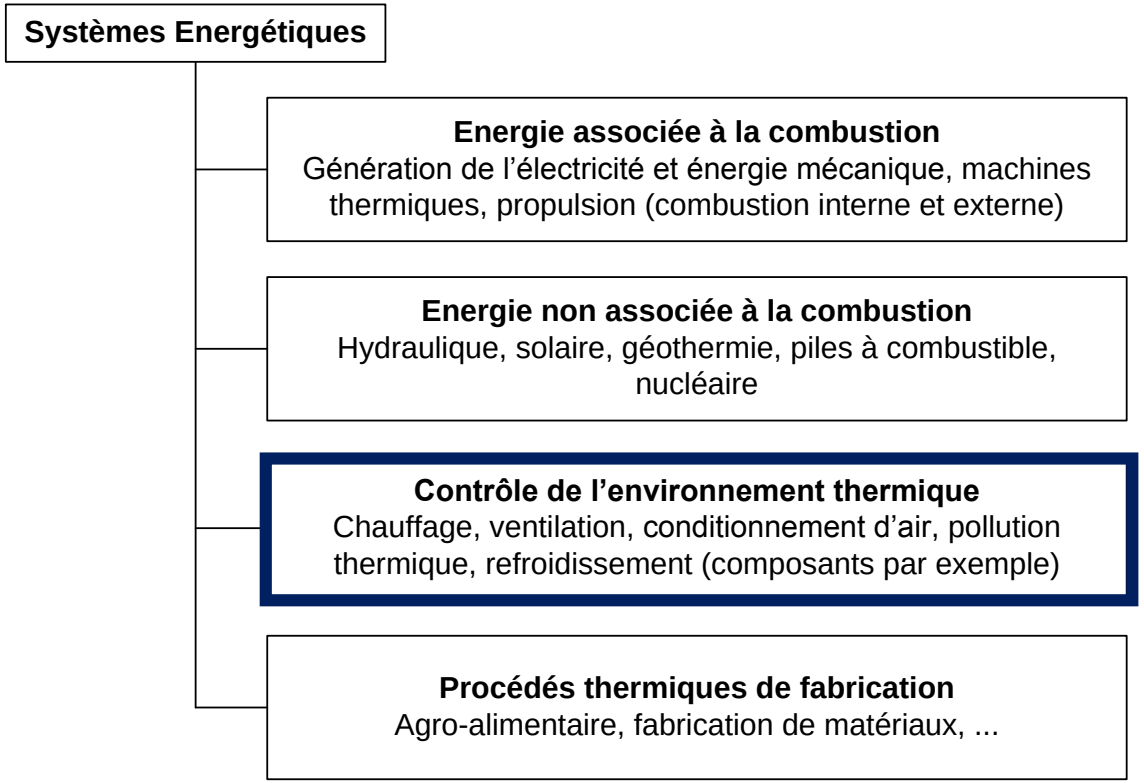


Système FERME :

- **Pas d'échange de masse avec l'extérieur**

Système OUVERT

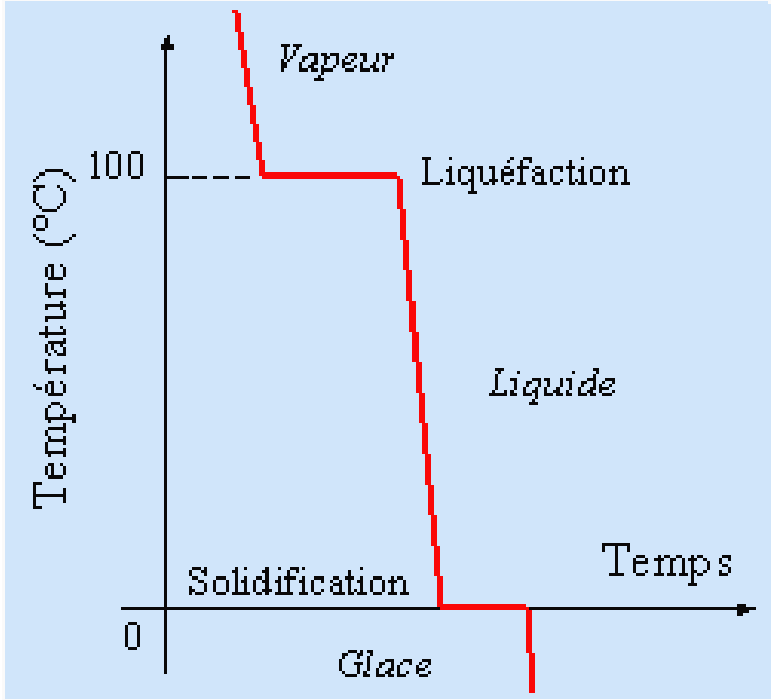
- **Avec échange de masse avec l'extérieur**



Notions de Thermodynamique

❑ Chaleur Latente et Changement d'état

- **Fusion**
- **Solidification**
- **Evaporation**
- **Condensation**



❑ Exemple :

- **Chaleur de liquéfaction d'un glaçon : 333 kJ/kg**
- **Energie chaleur pour passer de 20 à 100 °C d'un kg d'eau est : 333 kJ/kg**

Notions de Thermodynamique

- **La thermodynamique englobe l'étude de phénomènes faisant intervenir la "chaleur"**

- **La thermodynamique est basée sur :**
  - **Postulats**
  - **4 principes fondamentaux**
    - **Principe zéro**
    - **Premier principe**
    - **Deuxième principe**
    - **Troisième principe**

Notions de Thermodynamique

➢ Postulat de Clausius

*« Une transformation thermodynamique dont le seul résultat final serait de transférer de la chaleur d'un corps à une température donnée à un corps à une température plus élevée est **impossible** »*

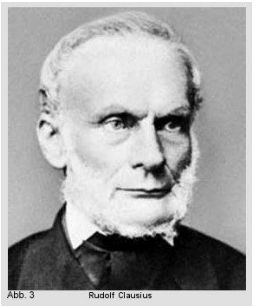
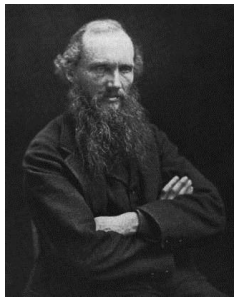


Abb. 3 Rudolf Clausius

➢ Postulat Kelvin

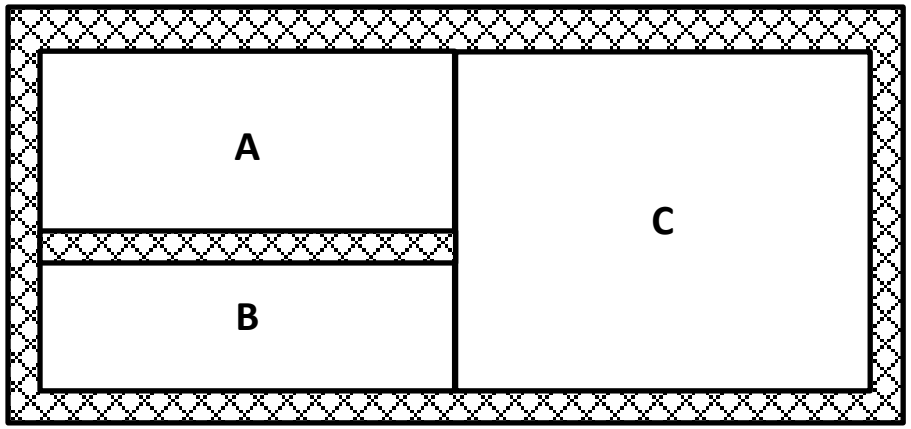
*« Une transformation thermodynamique dont le seul résultat final serait de transformer en travail de la chaleur extraite d'une source à température uniforme est **impossible** »*



Notions de Thermodynamique

Principe ZERO / ou principe d'équilibre

Il existe une grandeur commune entre 3 systèmes thermodynamique : TEMPERATURE



Notions de Thermodynamique

- **L'énergie Chaleur est une forme d'énergie qui ne se perd pas et ne peut qu'être transformé en une autre forme d'énergie**

- **Premier Principe**

  - ✓ **Principe de la conservation de l'énergie**

  - ✓ **Il est possible de passer d'une forme d'énergie à une autre**

  - ✓ **C'est le principe d'équivalence énergétique entre le travail mécanique et l'énergie chaleur**

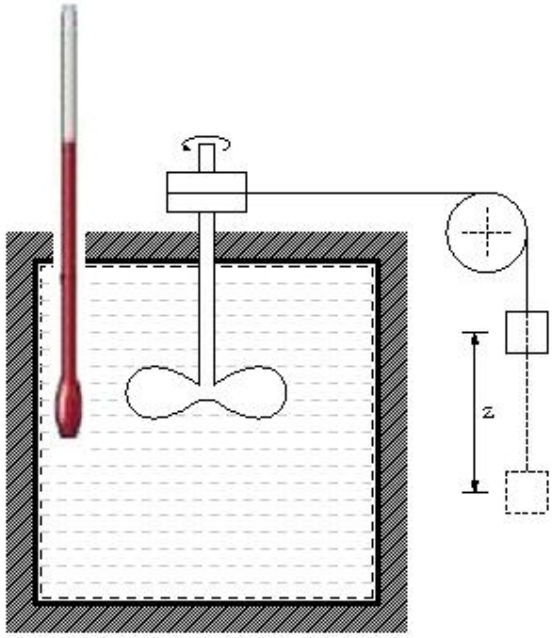
Notions de Thermodynamique

- ***Premier Principe : Système FERME***

$$dU = \delta W + \delta Q$$

$$dU_t = dU + dE_k + dE_p = \delta W + \delta Q$$

$$dE_k = m \cdot d\frac{\overline{V}^2}{2} \qquad dE_p = m \cdot g \cdot dz$$



$$\delta Q_k = m \cdot c \cdot dT$$

L'énergie interne "U" résulte de l'énergie des particules élémentaires constituent le système fermé et de leurs interactions ainsi que de toutes autres formes d'énergies connues liées à la masse

Notions de Thermodynamique

- ***Premier Principe : Système OUVERT***

$$dU_t = \delta W + \delta Q + \sum_i u_{t,i} \cdot dm_i$$

$$dU_t = \delta E + \delta Q + \sum_i h_{t,i} \cdot dm_i$$

$$\frac{dU_t}{dt} = \delta \dot{E} + \delta \dot{Q} + \sum_i h_{t,i} \cdot d\dot{m}_i$$

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

$$\delta E = \delta W + d(p \cdot V)$$

Notions de Thermodynamique

- ***Système FERME***

$$d\frac{\overline{V}^2}{2} + g \cdot dz + \delta r - \delta w = -du + \delta q + \delta r$$
$$= p \cdot dv$$

- ***Système OUVERT***

$$d\frac{\overline{V}^2}{2} + g \cdot dz + \delta r - \delta e = -dh + \delta q + \delta r$$
$$= -v \cdot dp$$

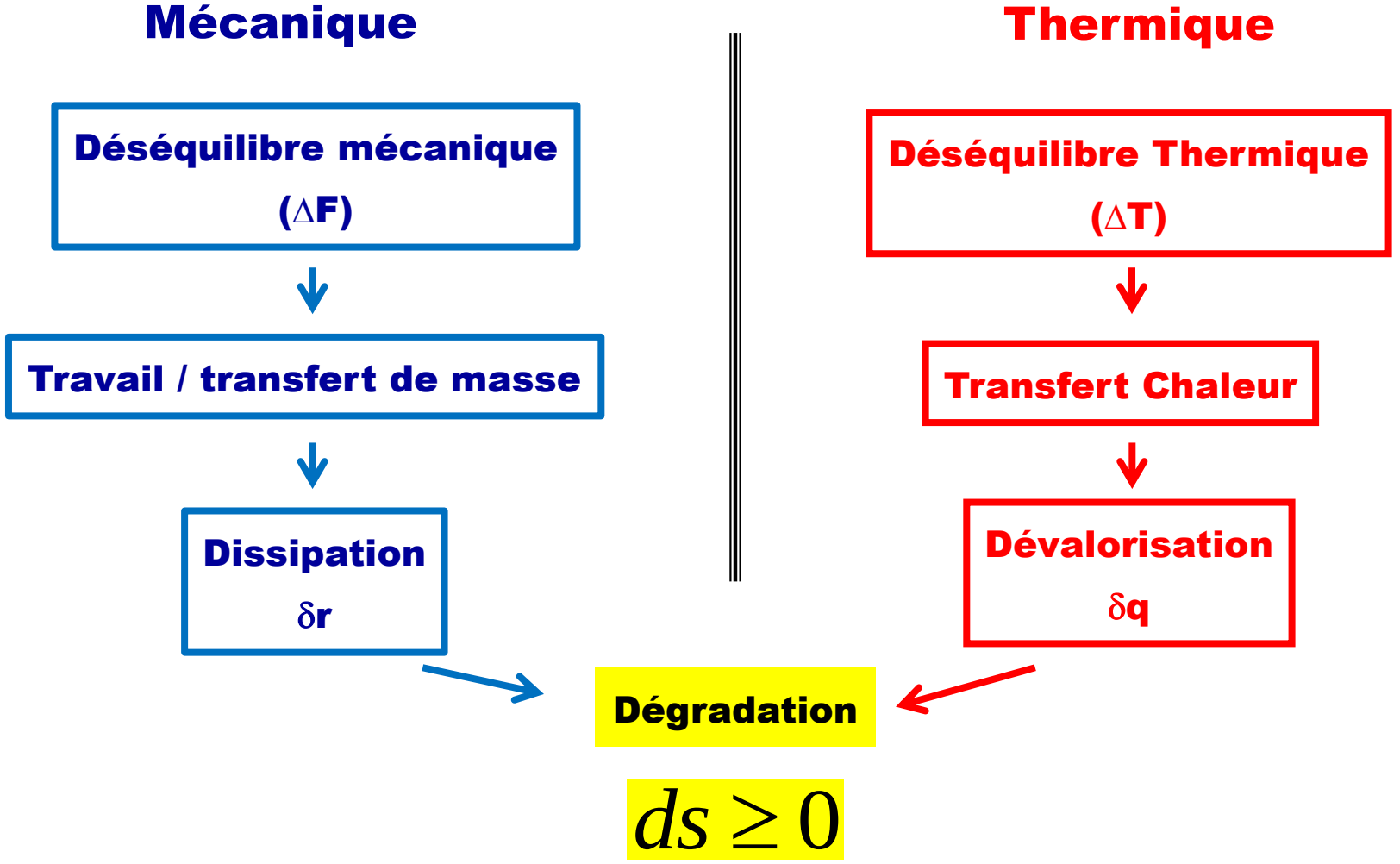
Notions de Thermodynamique

- **Deuxième Principe de la Thermodynamique :**
  - **Définit le sens privilégié dans lequel les transformations thermodynamiques peuvent se dérouler**
  - **Précise les conditions d'équilibre de l'état thermodynamique du système**

- **La variation de l'entropie d'un système thermodynamique quelconque, due aux opérations internes, ne peut être que positif ou nulle.**

$$\delta S_{int} \geq 0$$

Notions de Thermodynamique : Irréversibilités



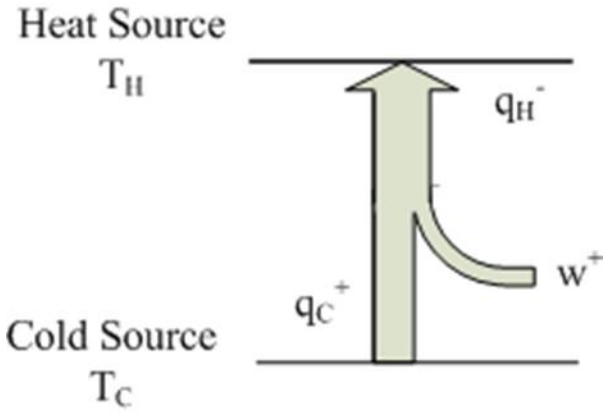
$$ds \geq 0$$

Cycles Générateurs

- Il reçoit de l'énergie travail et fournit de l'énergie chaleur en admettant une certaine dissipation de l'énergie mécanique qui lui est fournie.
- Le cycle générateur est décrit en sens inverse de celui d'un cycle moteur.

Le but du cycle générateur est de :

- permet de maintenir un écart entre deux sources thermiques
- soutirer de l'énergie chaleur à la source froide,
- fournir cette même énergie chaleur à la source chaude.



- Ceci n'est possible qu'en fournissant au système de l'énergie mécanique qui transformée en chaleur est cédé à la source chaude.
- Il y a donc dégradation du travail chaleur.

Efficacité / Rendement

- **Efficacité**
  - **Rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée pour le réaliser la prestation**

$$\text{Efficacité énergetique} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie dépensée}}$$

- **Rendement**
  - **rapport entre l'efficacité réelle de la machine et l'efficacité théorique maximale qu'on peut attendre d'elle.**

$$\eta = \frac{COP}{COP_{Carnot}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\text{Pertes du système}}{\text{Energies recues par le système}}$$

Efficacité de Carnot

- **Nicolas Léonard Sadi Carnot**

  L'efficacité maximale ne dépend que des températures des sources

  - **Réfrigération**

$$COP_{Ref} = \frac{Q_{Ref}}{\sum_i W}$$

- **Pompe à chaleur**

$$COP_{HP} = \frac{Q_{HP}}{\sum_i W}$$

Réfrigération : Coefficient de Performance

Cycle Générateur : Refrigerateur

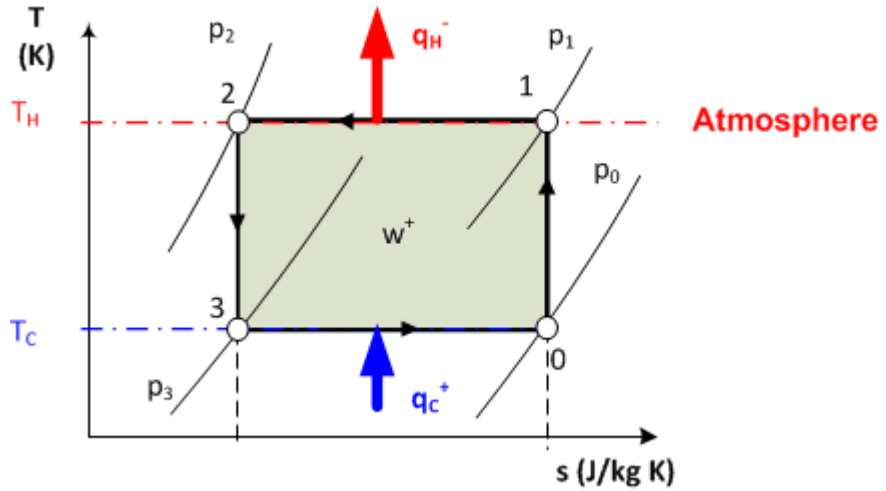
Premier Principe de la Thermodynamique

$$T \cdot dS = \delta Q + \delta R$$

$$\delta Q = T \cdot dS$$

$$Q_H = T_H \cdot (S_1 - S_2)$$

$$Q_C = T_C \cdot (S_0 - S_3)$$



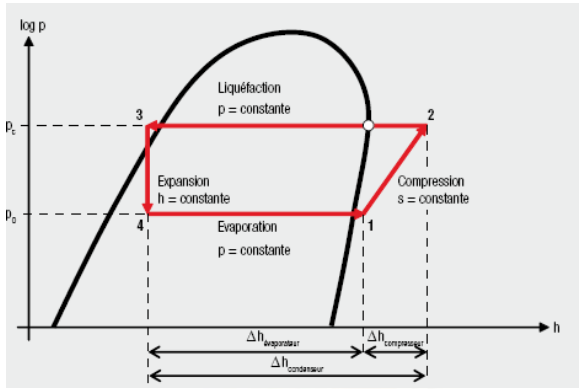
$$COP_{Carnot\ Ref} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

Cycle à compression

- **Il peut être réalisé au moyen de deux types de fluide parcourant le cycle :**
  - soit un gaz
    - le cycle ne présente pas de changement de phase lors des échanges de chaleur ou de détente,
  - soit une vapeur susceptible de se condenser.
    - Le cycle présente des changements de phase.
- **Il est avantageux de mettre en jeu lors des échanges de chaleur les chaleurs latentes.**

Réfrigérateur

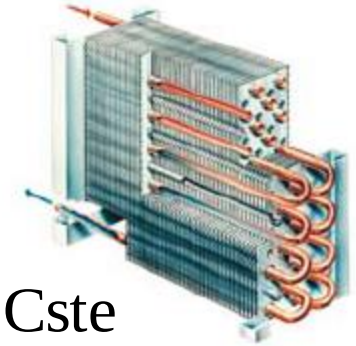
p = Cste



η_{isent}

$\eta_{volumétrique}$

h = Cste



p = Cste

Diagrammes Thermodynamiques

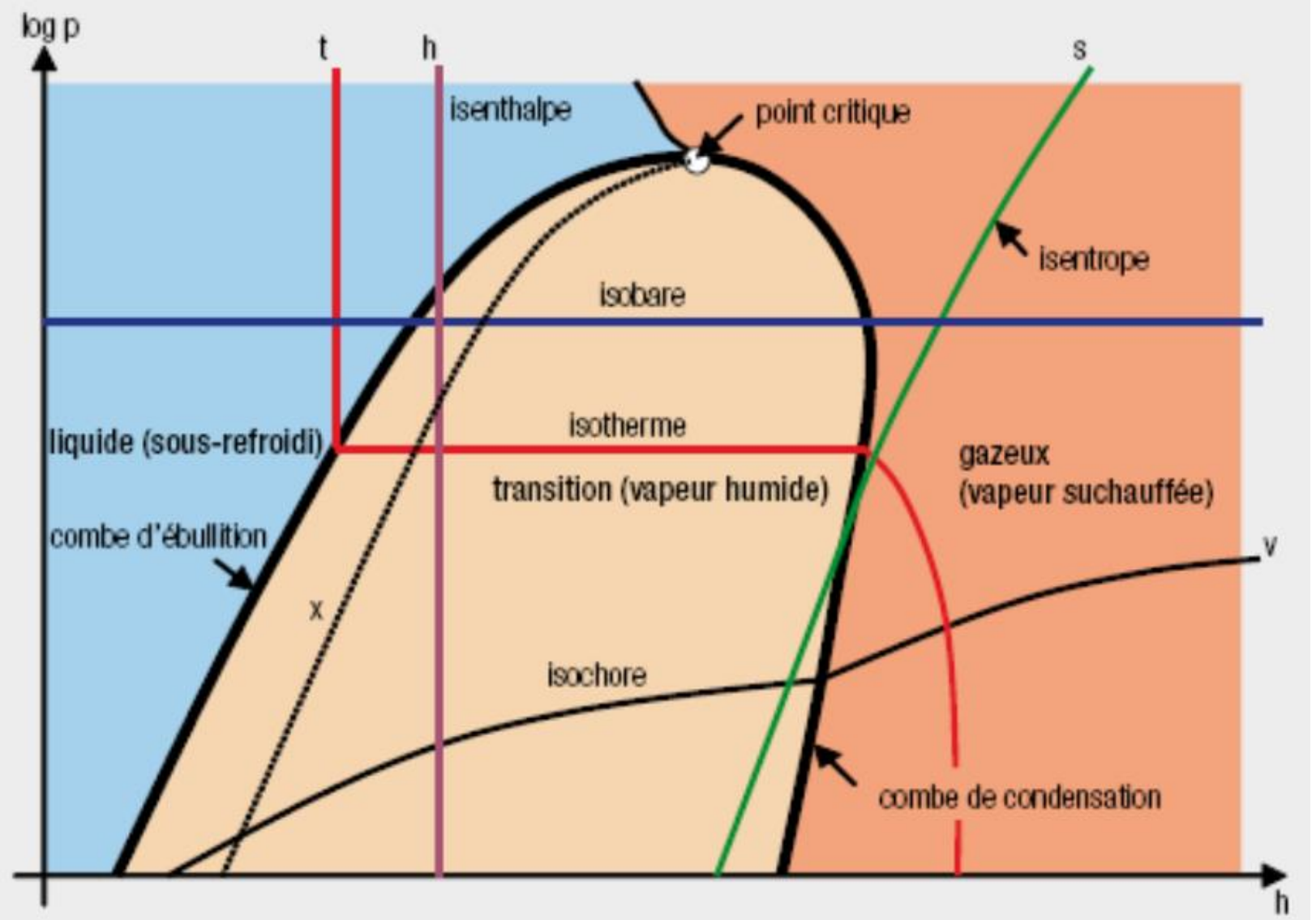
- Tout corps présente une équation d'état et il peut se présenter sous les trois états physiques solide, liquide ou gazeux.

$$p = \frac{r.T}{v-b} + \frac{A + B + C.EXP\left(-\frac{kT}{T_K}\right)}{(v-b)^2} + \ldots.$$

- Les deux principes de la thermodynamique sont utilisés pour étudier les relations existant entre les diverses grandeurs caractérisant l'état d'un fluide (p, T, v, h, s).

- En général, l'équation d'état n'est pas simple.
  - Le diagramme est la représentation graphique de l'équation d'état d'un fluide.

Diagramme des frigoristes



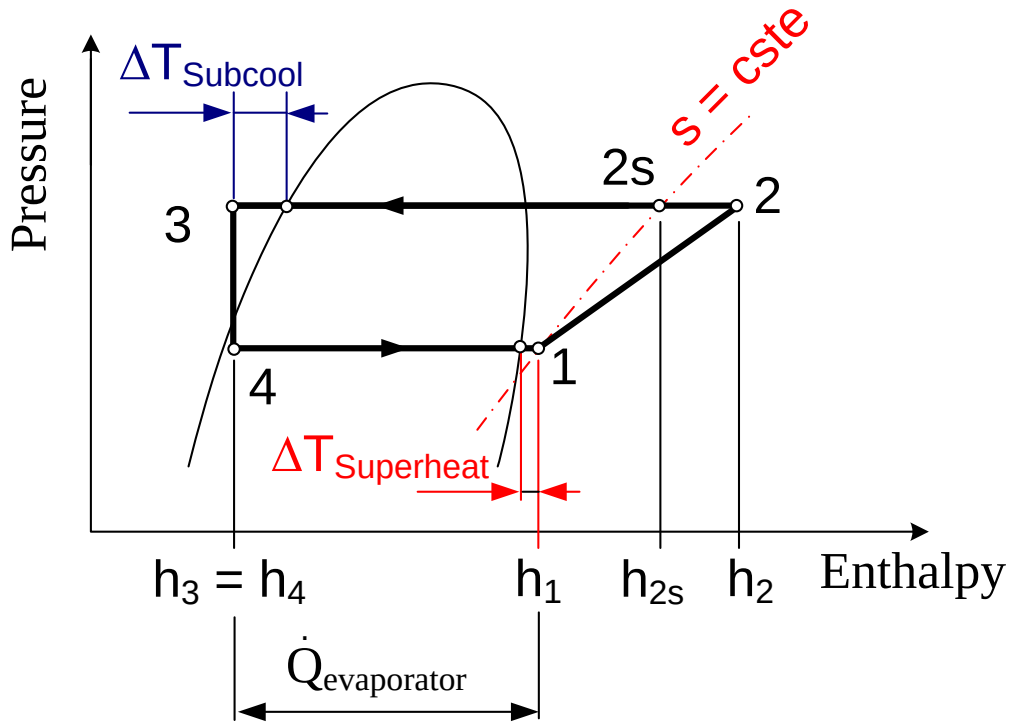
Efficacité de réfrigération

$$\dot{Q}_{evaporator} = \dot{m}_{Refrig} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{Condenseur} = \dot{m}_{Refrig} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\dot{W}_{Comp} = \dot{m}_{Refrig} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{Condenseur} = \dot{Q}_{Evaporateur} + \dot{W}_{Comp}$$



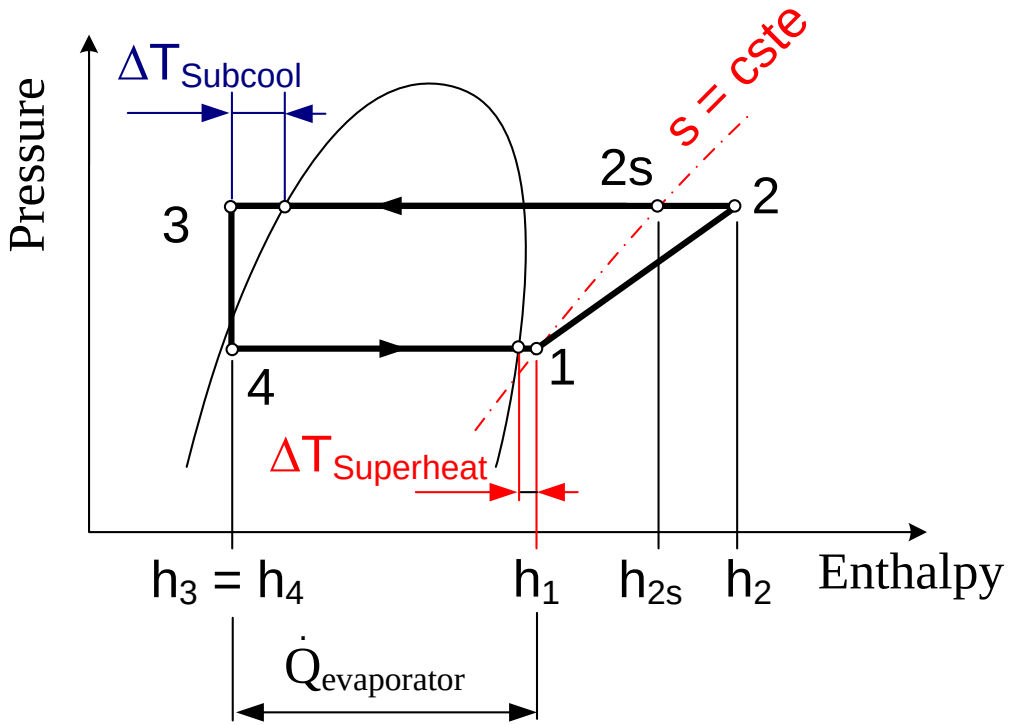
$$COP_{Refr} = \frac{\dot{Q}_{évaporateur}}{\dot{W}_{Comp} + \sum_i \dot{W}_i}$$

$$COP_{Refr} = \frac{\dot{Q}_{evaporateur}}{\dot{W}_{comp}}$$

$$COP_{Refrig} = \frac{\dot{m}_{refrig} \cdot (h_1 - h_4)}{\dot{m}_{refrig} \cdot (h_2 - h_1)}$$

Cycle Réel de compression

- **Pour le cycle réel,**
  - **il existe de la dissipation pour frottement et le compresseur. On définit le rendement isentropique du compresseur**



$$\eta_s = \frac{w_s}{w_k}$$

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Rendement Volumétrique

❑ Rendement Volumétrique

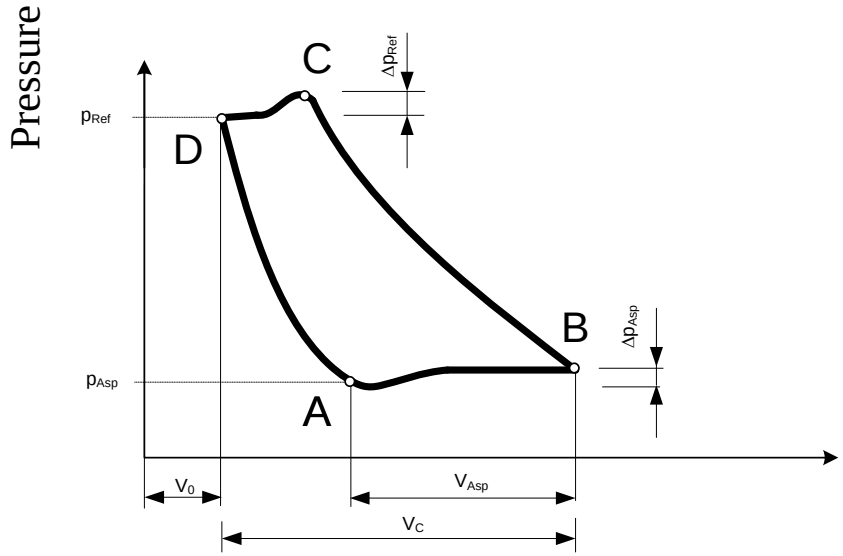
$$\eta_{vol} = \frac{V_{asp}}{V_C}$$

$$\eta_{vol} = 1 - \frac{V_0}{V_C} \cdot \left(\pi_K^{1/n} - 1 \right)$$

❑ Masse Transvasée

$$m_{transv} = \rho \cdot V_{asp}$$

$$m_{transv} = \rho \cdot \eta_{vol} \cdot V_C$$



❑ Rapport de pression Critique

$$\eta_{vol} = 0$$

$$\pi_{K,crit} = \left(\frac{V_0 + V_C}{V_0} \right)^n$$

Production Frigorifique Volumétrique

- La puissance frigorifique peut être exprimée en fonction du rendement volumétrique

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{asp} \cdot \left(\Delta h_{evaporateur}\right)$$

$$\dot{m}_{asp} = \rho_{asp} \cdot V_{asp}$$

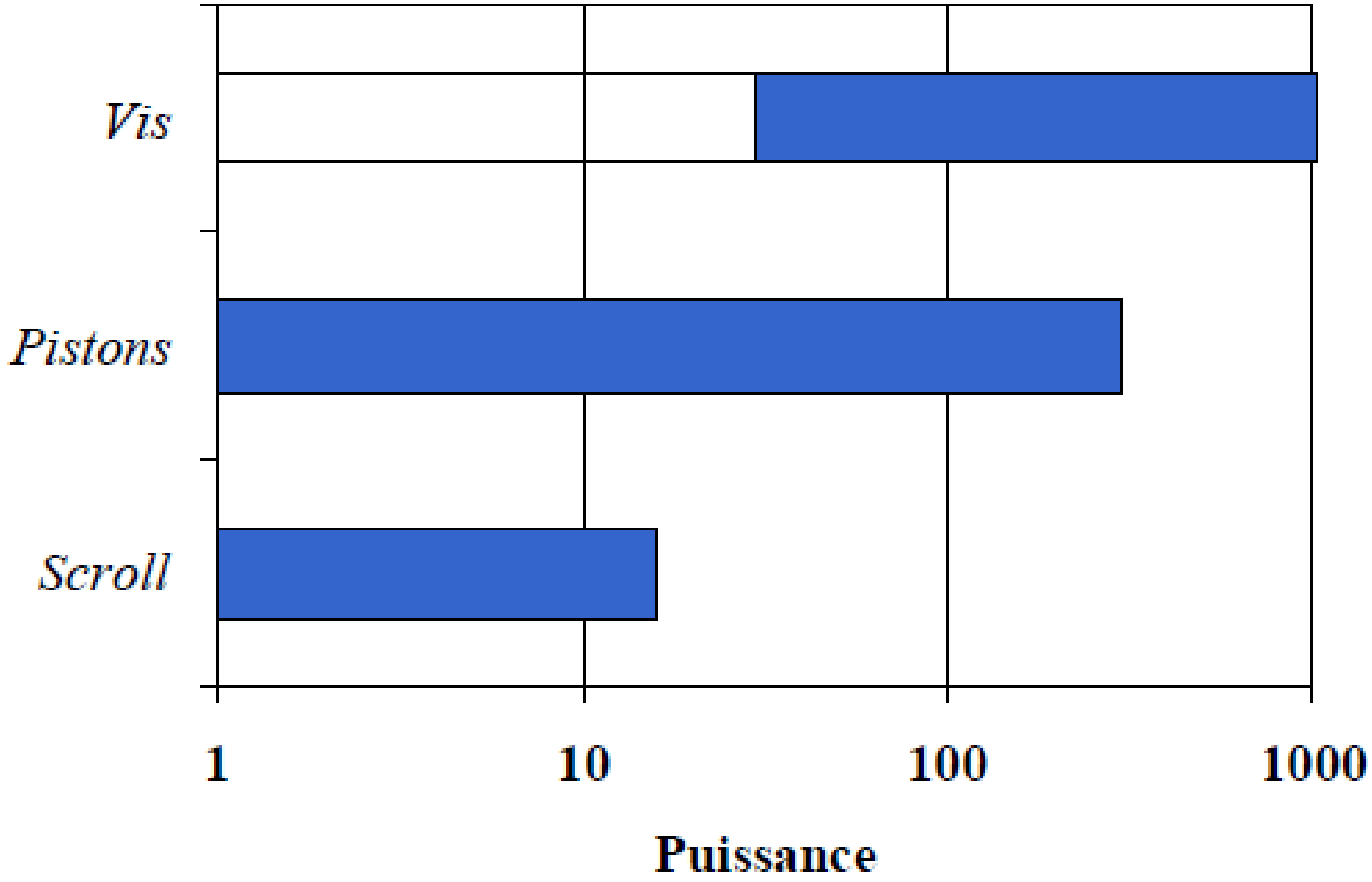
$$\dot{Q}_{evap} = \eta_{vol} \cdot \dot{V}_C \cdot \left(\frac{\Delta h_{evaporateur}}{v_{asp}}\right)$$

Production frigorifique volumétrique en kJ.m^{-3}

Compresseurs

Type de compresseur	Piston	Piston tournant	Hélicoïdal	Turbocompresseur
Principe de fonctionnement	Volumétrique piston alternatif	Volumétrique piston tournant	volumétrique vis	à impulsions
Compression	statique	statique	statique	dynamique
Cylindrée	Déterminée géométrique	Déterminée géométrique	Déterminée géométrique	Fonction de la contre-pression
Débit à pression variable	presque constant	Presque constant	presque constant	fluctuations important
Refoulement	pulsé	presque continu	presque continu	continue
Plage de débit m3/h	≤ 1000	350 ÷ 5600	500 ÷ 5000	> 800
Taux de compression par étage	8 ÷ 10	5 ÷ 6	25 ÷ 30	3.5 ÷ 4
Variation de puissance	par palier mais très limité	difficile et très limité	progressive et illimitée	progressive et limitée par la zone de pompage

Compresseurs



TEWI

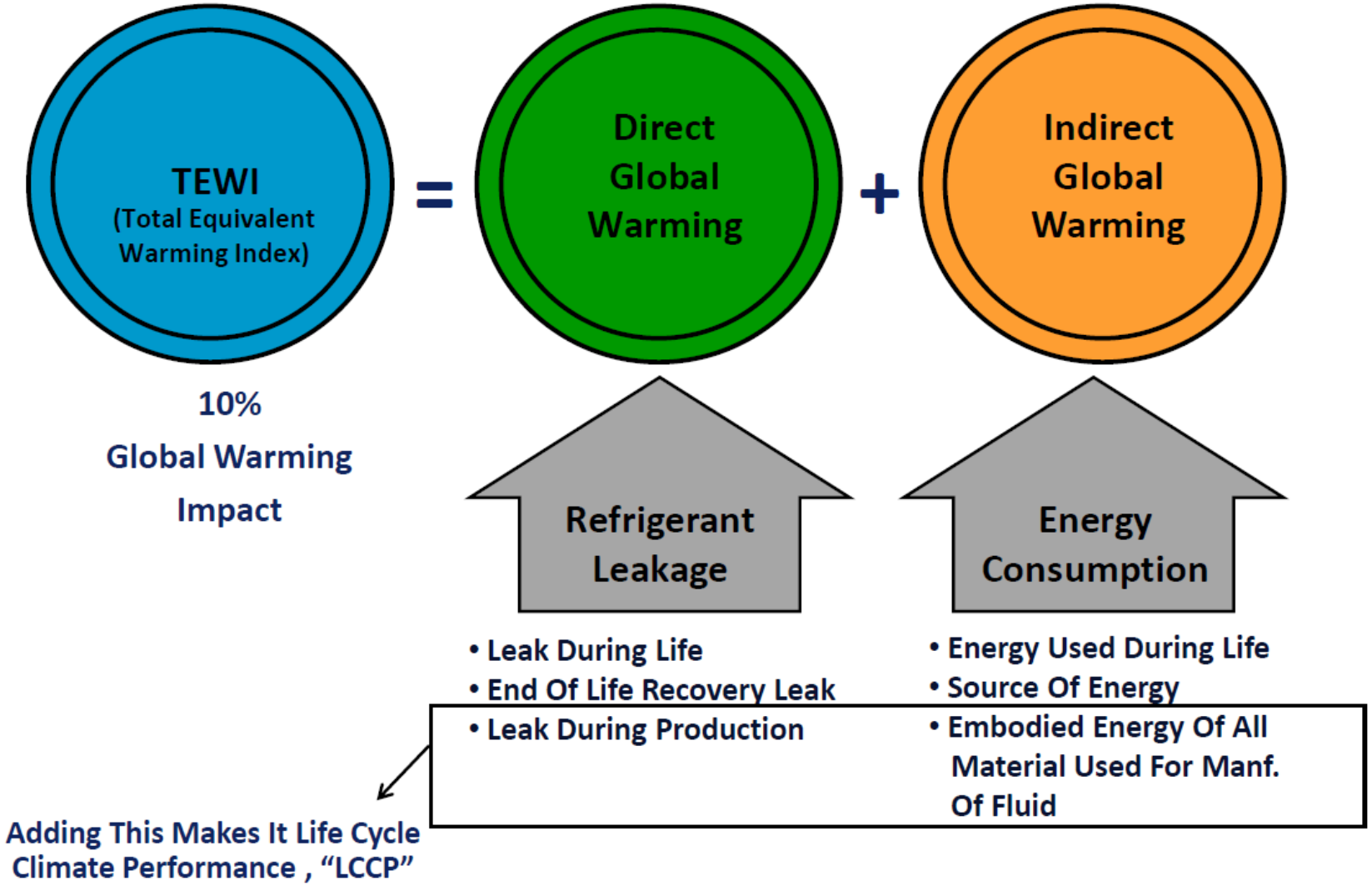
- **L'analyse de l'impact des installations frigorifiques sur l'effet de serre montrent qu'il faut prendre en compte deux contributions :**
  - les émissions de CO_2 associées à la consommation d'énergie
  - et les émissions directes de fluide frigorigène à l'atmosphère.

- **Le concept de TEWI a été introduit pour prendre ces éléments en compte.**

.

Element de base R744

Refrigerants Should Be Measured On Life Cycle Performance – TEWI Or LCCP



TEWI

Fuites

Fin de vie

$$TEWI = n \cdot (GWP \cdot m_i \cdot d_e) + GWP \cdot m_i \cdot (1 - d_r) + (E \cdot b) \cdot t \cdot n$$

Direct

Indirect

GWP	kg de CO_2 équivalent au rejet d'un kg de fluide
m_i	charge initiale de fluide frigorigène en kg
d_e	taux d'émission annuel (kg de fluide émis/kg de charge initiale)
n	Durée de vie de l'installation (année)
d_r	Efficacité de récupération lors de la fin de vie (kg de fluide récupéré/charge initiale)
E	Consommation journalière d'électricité (kWh / 24 h)
b	Emission de CO_2 par kWh d'énergie électrique produite (kg CO_2/kWh)
t	nombre de jours de fonctionnement annuel (jours/an)

TEWI

- Le paramètre b dépend beaucoup du moyen utilisé pour la production de l'électricité, et ceci est très différent d'un pays à l'autre.
  - Par exemple, en France la valeur moyenne en 1998 est de 95 g équivalent CO_2/kWh alors que la valeur
  - moyenne européenne est de 460 g équivalent CO_2/kWh (2003).

- Selon IIR / IIF
  - contribution directe est de 75 % en moyenne
  - contribution indirecte : 25 %.

EU Regulation
Efficiency Energy Index

$$EEI = \frac{AEC}{SAEC} \cdot 100$$

$$SAEC = V_{eq} \cdot M \cdot N + CH$$

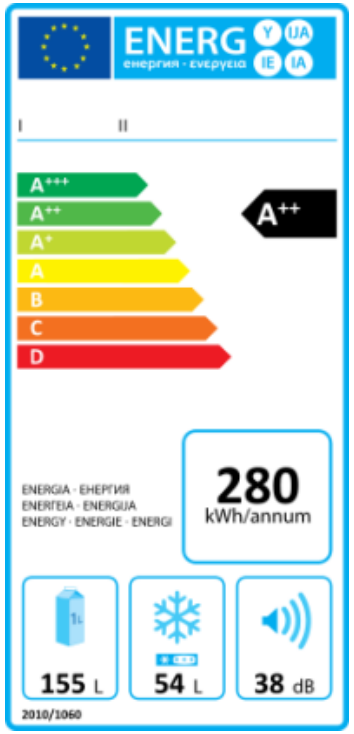
- **AEC : Annual Electricitry Consomption in kWh/year**
- **AEC = E_{24h} *365**
- **E_{24h} : according with EN ISO 15502**
- **SAEC : Standart Annual Electricitry Consomption**
- V_{eq} est le volume équivalent de l'appareil de réfrigération ménager
- CH est égal à 50kWh/an pour les appareils disposant d'un compartiment pour denrées hautement périssables ayant un volume de stockage minimum de 15 litres

EU Regulation
No 643/2009 de la commission 22th of July 2009

- **Pour la catégorie de réfrigérateur comportant un ou plusieurs compartiments de stockages de denrées alimentaire fraiche (Catégorie 1), les valeurs M et N sont données par le tableau**

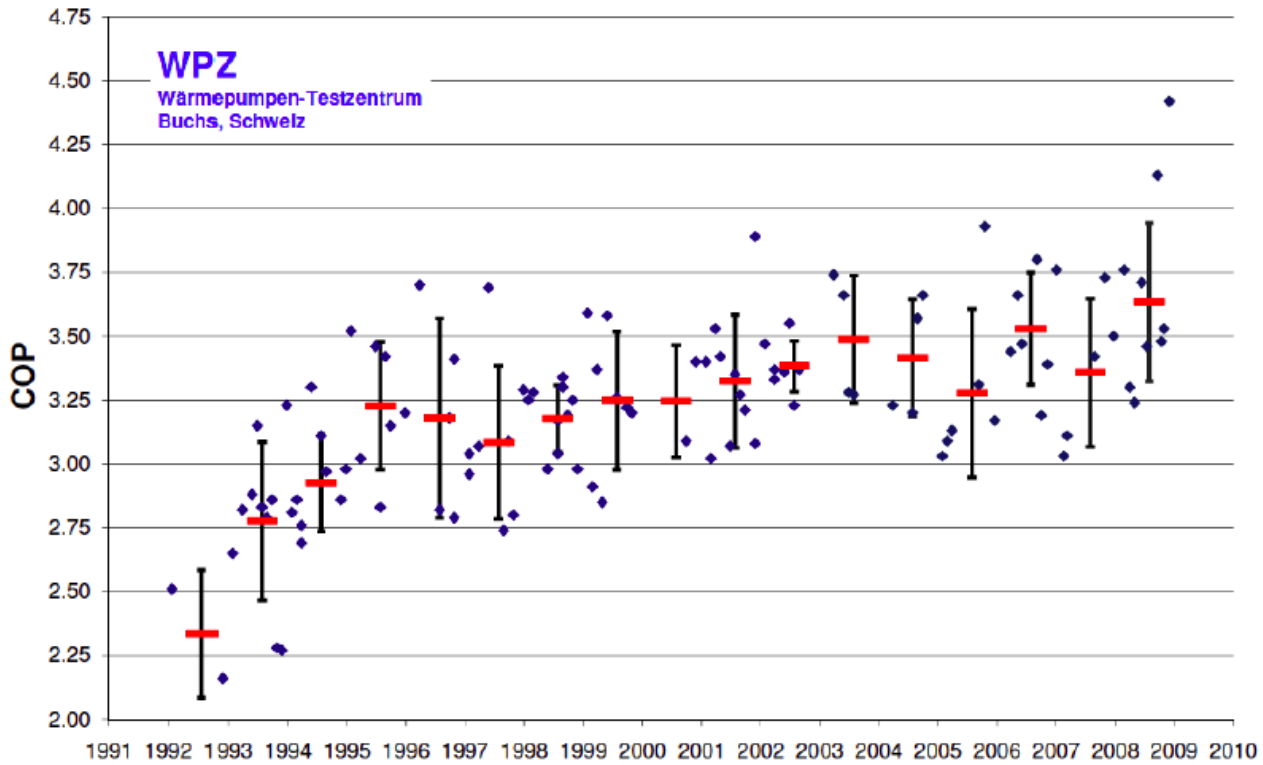
Catégorie	M	N
1	0.233	245

	A+++	A++	A+	A	B	C	D
EEI	**< 22**	**< 30**	**< 42**	**<55**	**< 75**	**< 95**	**< 110**



Evolution historique du COP

LAMD LABORATORY FOR APPLIED MECHANICAL DESIGN



- Depuis l'introduction des compresseurs scroll les COP stagnent
- Comment est-ce que nous pouvons introduire une nouvelle amélioration?

Et…

- Réduire l'impact des réfrigérants
- Augmenter le COP
- Innovation dans la réfrigération

Merci pour votre attention