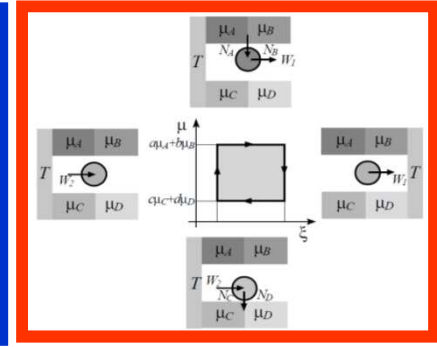
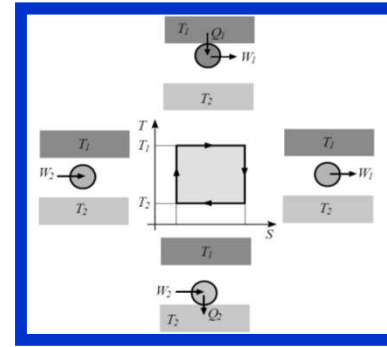
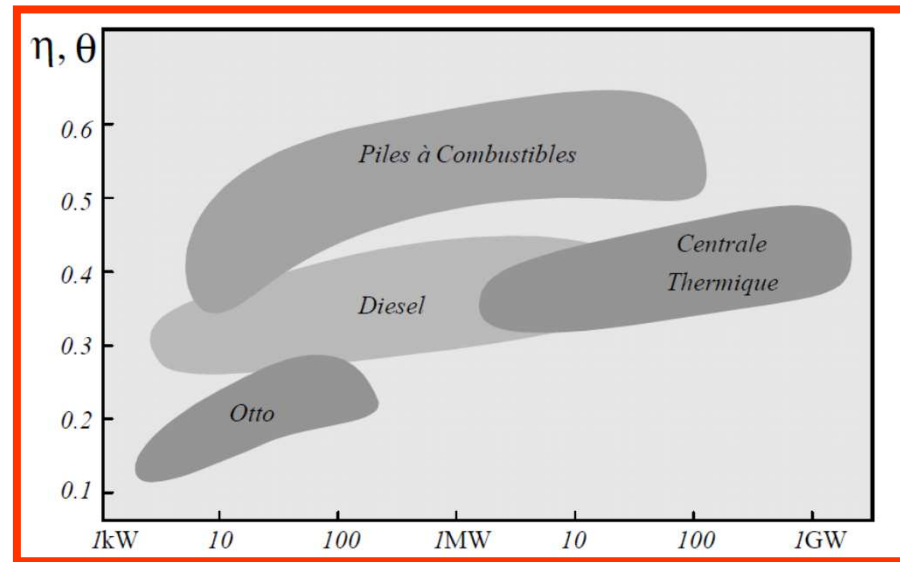
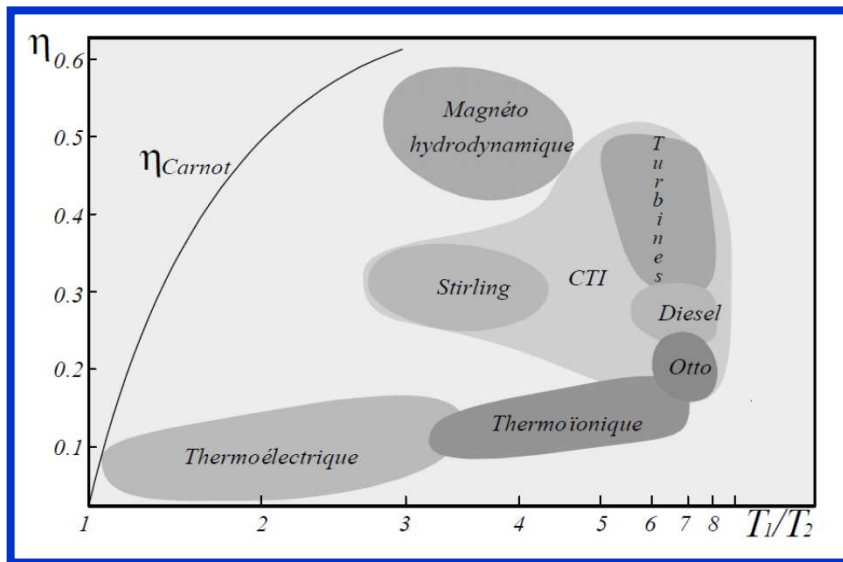




Efficacités des Machines (de conversion d'énergie) Thermiques (cinétique) et Chimiques (potentielle)



PHYSIQUE

PHYSIQUE DE
LA CONVERSION D'ÉNERGIE

JEAN-MARCEL RAX

Les gradients des variables thermodynamiques intensives, potentiels mécanique et électrique, pression, température et potentiel chimique, constituent des écarts à l'équilibre thermodynamique permettant d'extraire du travail de notre environnement. Les processus de conversion d'énergie utilisant ces sources d'énergies libres sont accompagnés d'une production d'entropie qui dégrade l'efficacité de conversion.

Cet ouvrage de *Physique de la conversion d'énergie* est issu de plusieurs cours enseignés en France et à l'étranger, principalement en M1 et M2 à la Faculté des sciences d'Orsay et à l'École Polytechnique. Il est articulé autour de deux axes principaux :

- l'étude des concepts et méthodes de la physique des processus irréversibles, orientée vers l'identification et l'analyse des mécanismes de production d'entropie ;
- la description et l'analyse physique des principes et limitations des générateurs magnétohydrodynamiques, thermoélectriques, thermoioniques, photovoltaïques et électrochimiques.

Ce livre vise à offrir aux étudiants de nos facultés, aux élèves de nos écoles et aux chercheurs de nos instituts, une monographie permettant d'aborder les questions de l'efficacité et du rendement des systèmes de conversion d'énergie dans la continuité des cursus de physique appliquée, de physique fondamentale, ou d'ingénierie généraliste, aux niveaux M1-M2-D.

Jean-Marcel Rax est professeur à l'École Polytechnique et professeur à l'Université de Paris-XI, il a travaillé au JET à Oxford et au PPPL à Princeton où ses travaux originaux sur l'extraction d'énergie libre dans les réacteurs thermonucléaires lui ont valu plusieurs prix et distinctions : il est Fellow de l'APS, a reçu la Médaille d'argent du CNRS, le Prix Plasma de la SFP et le Prix de la Recherche pour l'Énergie.

Série Physique et collection dirigée par Michèle LEDUC

SAVOIRS ACTUELS

CNRS ÉDITIONS
www.cnrseditions.fredp sciences
www.edpsciences.org

Création graphique : Blatrice Couffé



49 €

ISBN EDP Sciences 978-2-2518-8742-5
ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-87734-3

Ces ouvrages, écrits par des chercheurs, reflètent des enseignements dispensés dans le cadre de la formation à la recherche. Ils s'adressent donc aux étudiants avancés, aux chercheurs desirant perfectionner leurs connaissances ainsi qu'à tout lecteur passionné par la science contemporaine.

PHYSIQUE

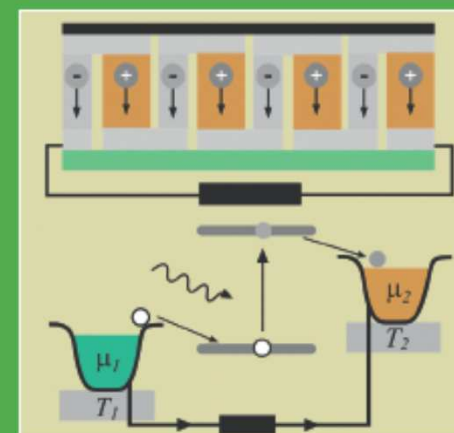
SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

PHYSIQUE DE
LA CONVERSION D'ÉNERGIE

JEAN-MARCEL RAX

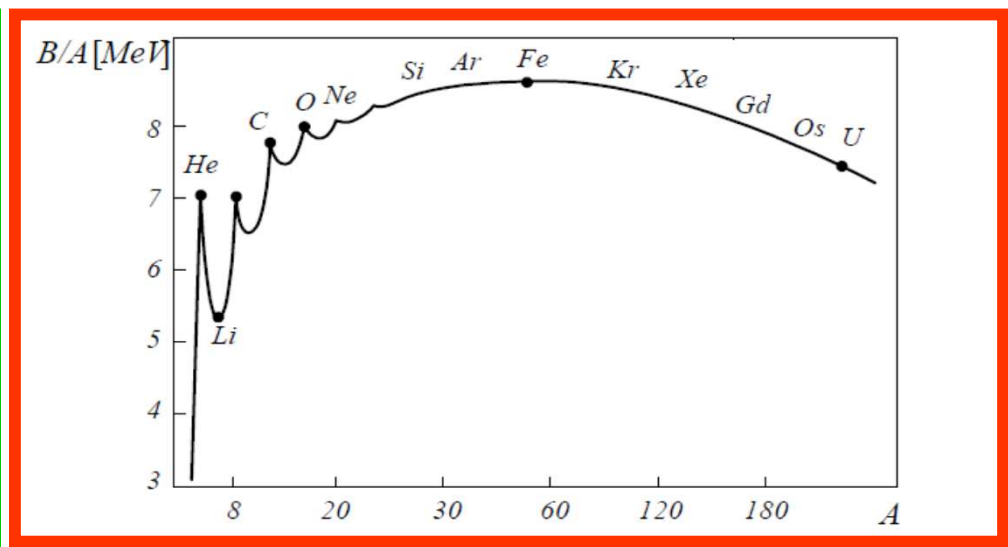
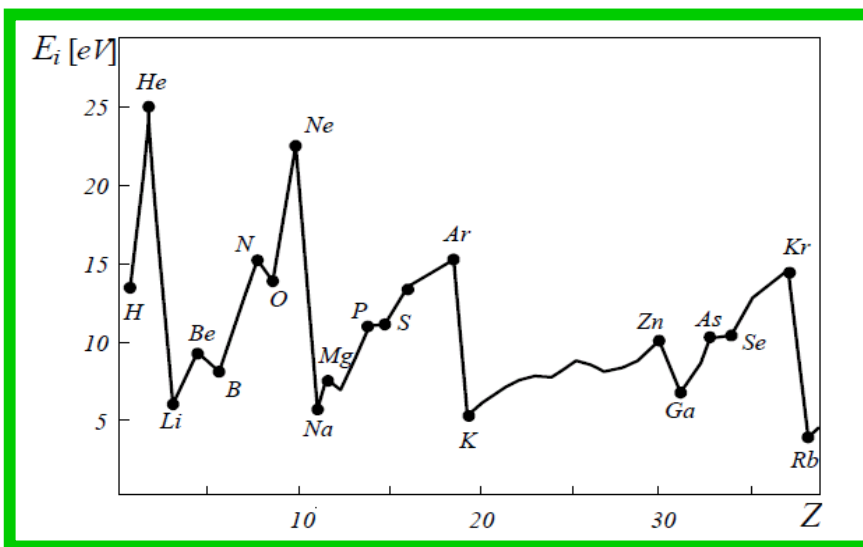
edp
sciencesPHYSIQUE DE
LA CONVERSION
D'ÉNERGIE

JEAN-MARCEL RAX

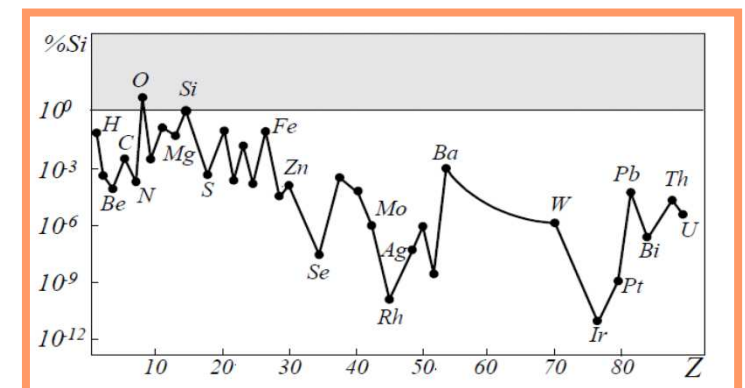
CNRS ÉDITIONS

edp sciences

En stock : chimique et nucléaire
En flux : solaire (...), géothermique : stock nucléaire



Excitation/Transition	Ordre de grandeur [eV]
Moléculaire Rotationnelle/Vibrationnelle	$\sim 10^{-3} \rightarrow 10^{-1}$
Moléculaire Translation	$\sim 10^{-1}$
Electronique Métaux et Semiconducteurs	~ 1
Electronique Atomes et Molécules	$\sim 1 \rightarrow 10$
Ionisation	$\sim 10 \rightarrow 10^2$
Nucléaire Fission/Fusion	$\sim 10^6$



Efficacités des machines thermiques et chimiques

- Introduction
- (E,S)
- Intensités, Extensités, Cycles
- Carnot vs Van't Hoff, T^*
- Cycles endo/exo-reversibles thermiques
- Cycles endo/exo-reversibles chimiques
- Flux et cycles
- Flux couplés optimaux (q,L)
- PV
- FC

$$\eta = 1 - (T_F/T_H)^{1/2}$$

$$\theta = \Delta G / 2\Delta H$$

$$\eta^* = \theta^*$$

$$\eta^* < \theta^*$$



1642 *Phlogistique et vis viva*

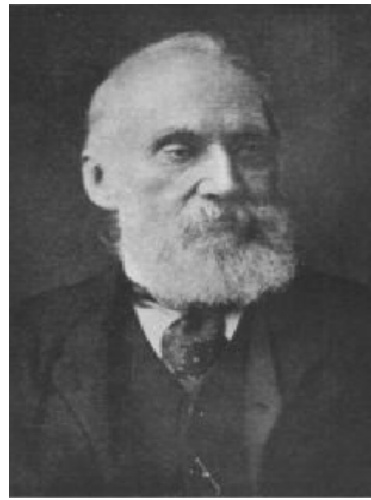
Energie (Young 1807) Travail (Poncelet 1826)

Chaleur (B Thomson, L/S Carnot...)

Energie, Chaleur, Travail (Mayer 1842)

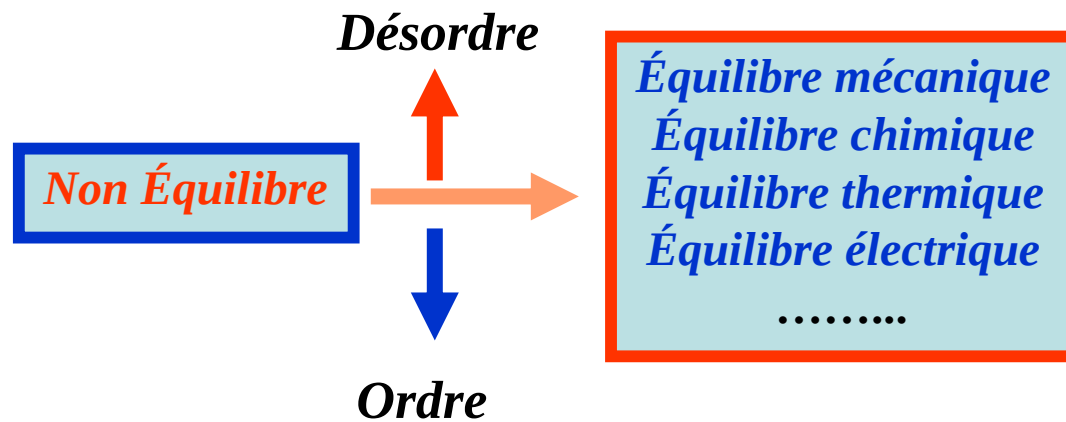
Chaleur = Travail (Joule 1845)

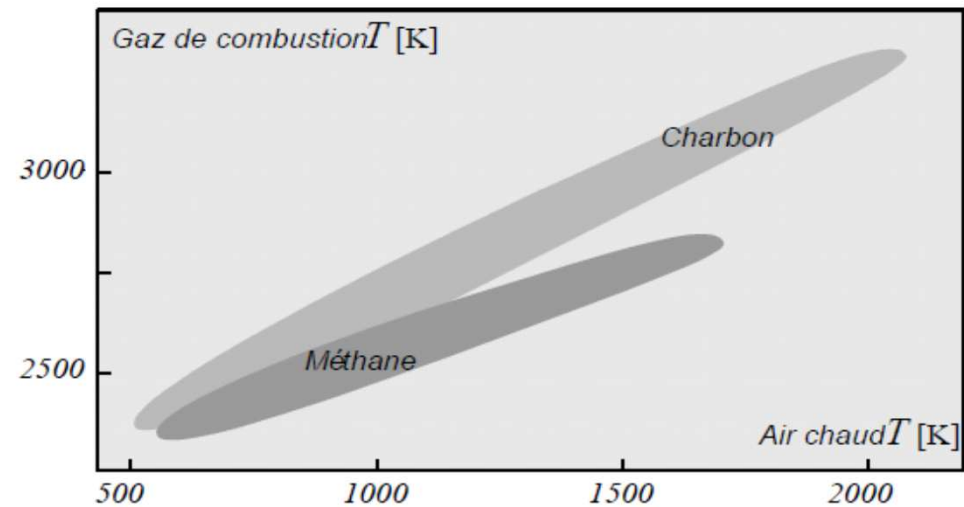
Energies libre, interne, potentielle... (W Thomson, Helmholtz, ...)



Chaleur / Travail, efficacité de conversion

$$\frac{OUT}{IN}$$





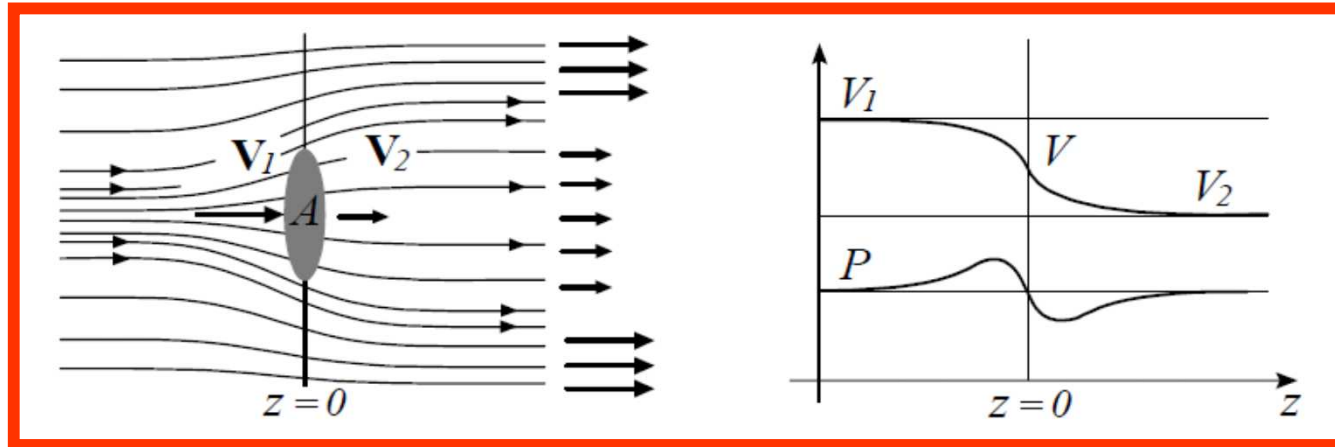
1830-1930-1980 8% $\rightarrow$ 2% $\rightarrow$ 30% $\rightarrow$ 60%

APS - WW 30% $\rightarrow$ 11-12% $\rightarrow$ (7 km/h)

FC 90% $\rightarrow$ 50%

CCUS 25% $\rightarrow$ 1%

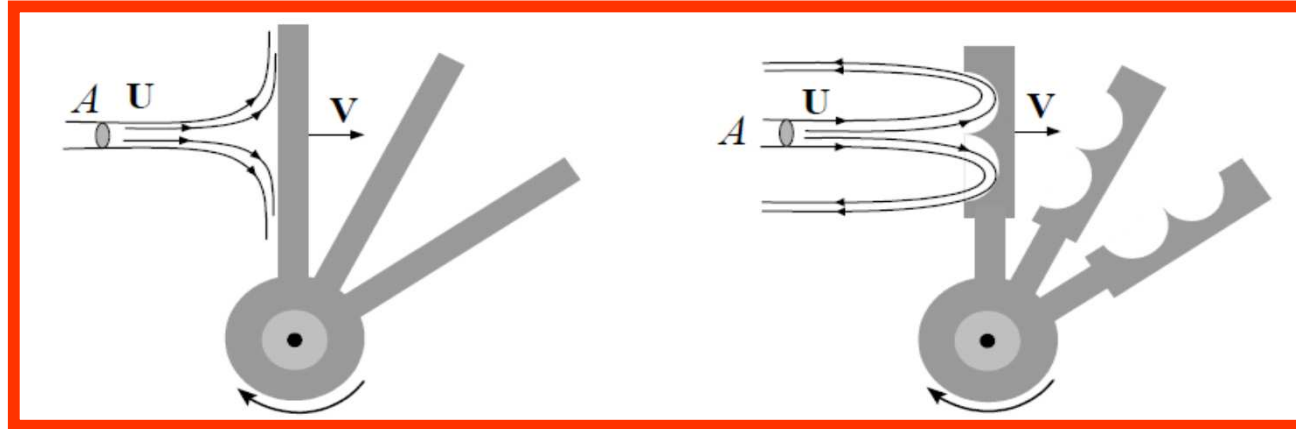
Mécanique/mécanique Eolien : Efficacité de Betz



$$F = \rho A V (V_1 - V_2) \xrightarrow{W_{out} = FV} V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\frac{dW_{out}}{dV_2} = 0 \rightarrow V_2 = \frac{V_1}{3} \rightarrow \frac{W_{out}}{W_{in}} \equiv \eta^* = \frac{8}{9}$$

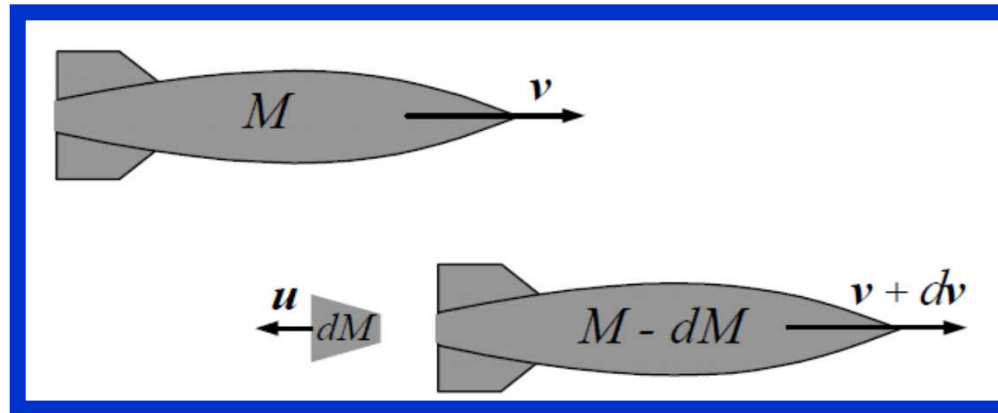
Mécanique/mécanique Hydraulique : Efficacité de l'aube et du godet



$$\mathbf{F} = \rho A U \mathbf{U} - \rho A U \mathbf{V} \rightarrow W_{out} = \rho A (U - V) \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}$$

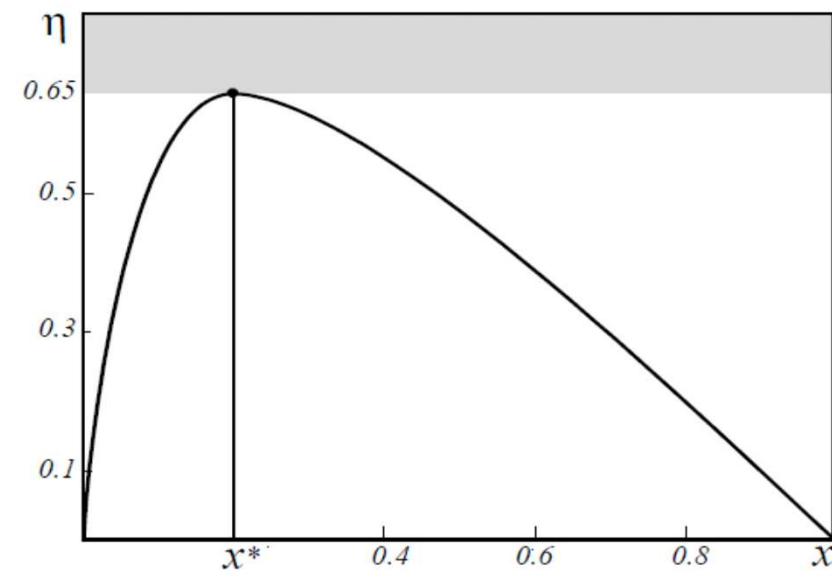
$$\eta \equiv \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{2(U - V)V}{U^2} \rightarrow \left. \frac{d\eta}{dV} \right|_{V=U/2} = 0 \rightarrow \eta^* = \frac{1}{2}$$

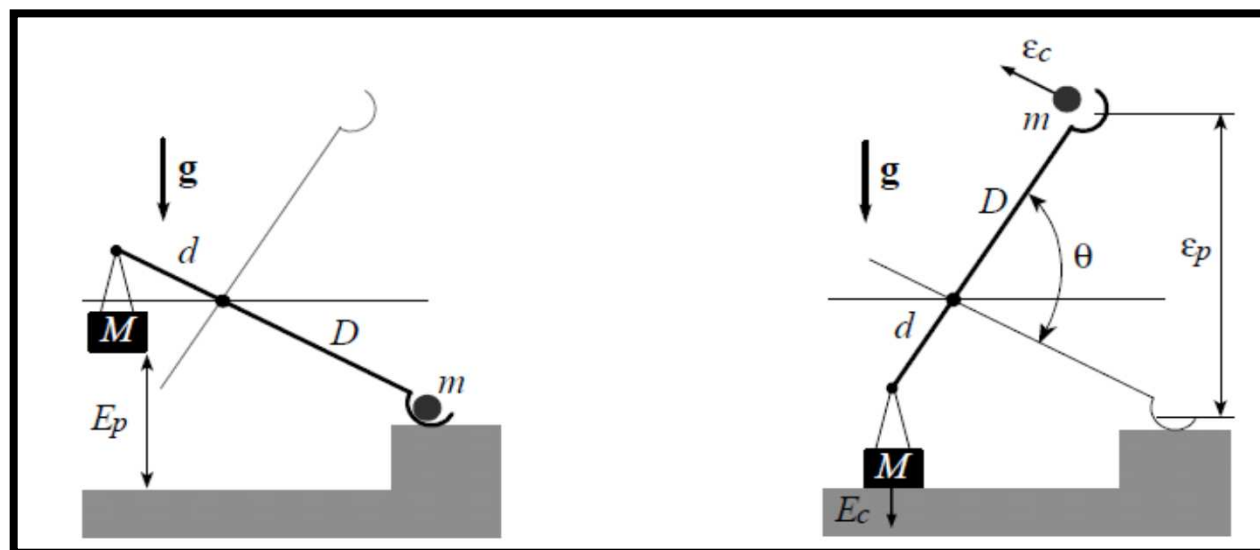
Astronautique : Efficacité de Tsiolkovsky

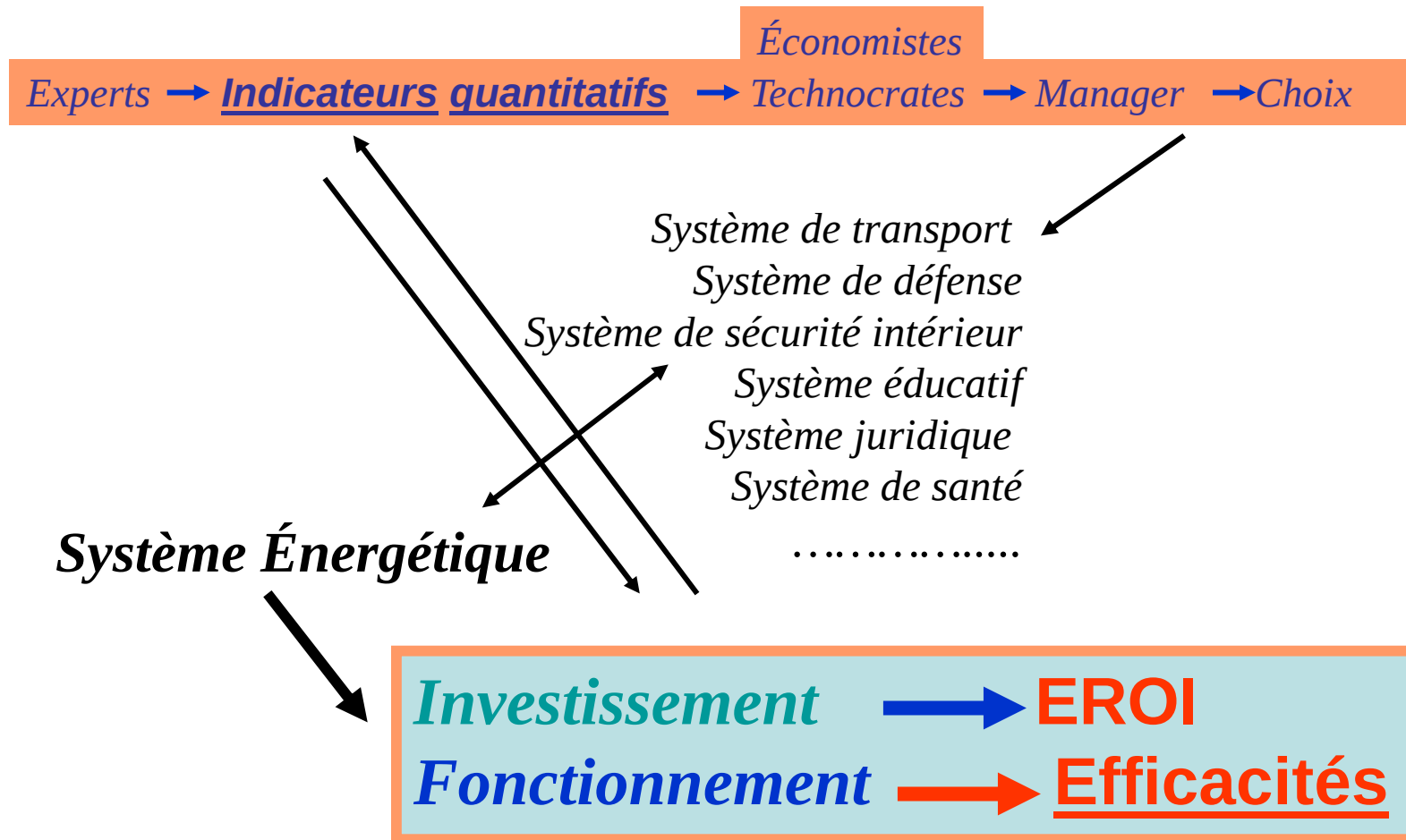


$$x \equiv \frac{M(t)}{M(0)} \leq 1 \rightarrow \eta \equiv \frac{M(t) v^2(t)}{[M(0) - M(t)] u^2}$$

$$\eta = x \log^2 x / (1 - x)$$



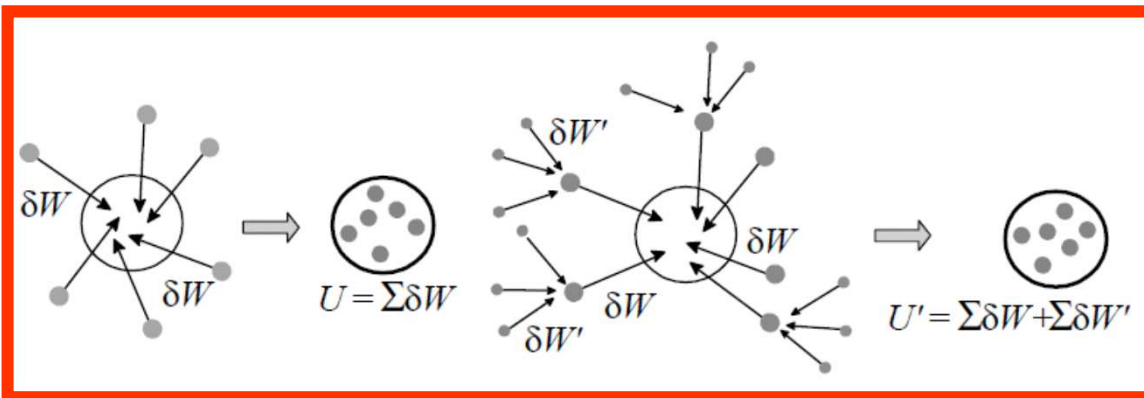




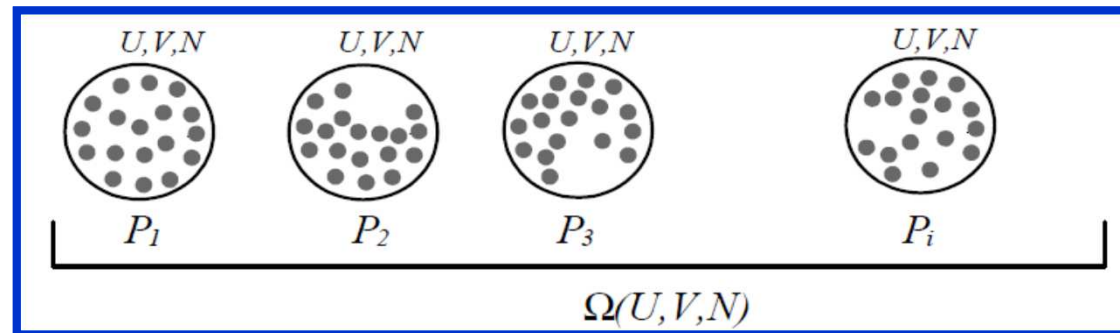
$\frac{OUT}{IN}$

- E/U/S

2 principes, 2 concepts opérationnels



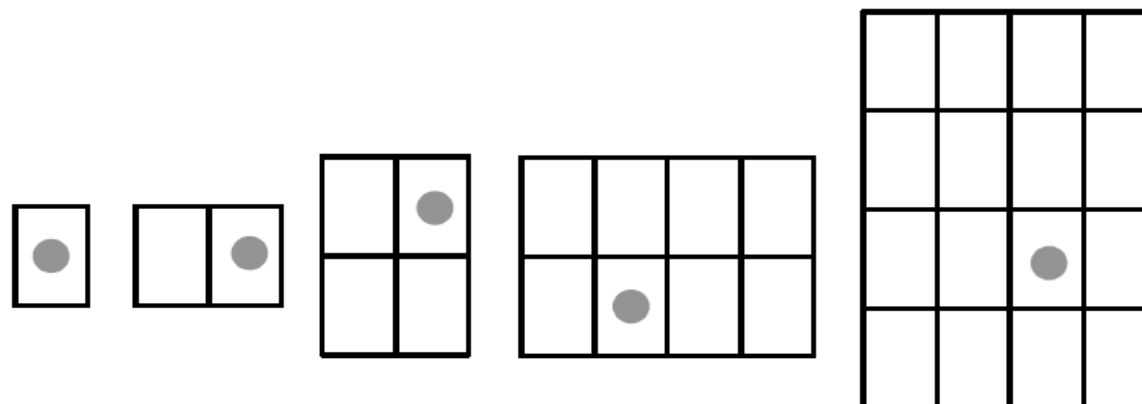
Energie interne E



Entropie $S = k_B \text{Log } \Omega$

Constante d'entropie de Boltzmann : $k_B \equiv 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Entropie



Nombre de questions

$$\underline{Q} = 0$$

$$\underline{Q} = 1$$

$$\underline{Q} = 2$$

$$\underline{Q} = 3$$

$$\underline{Q} = 4$$

Nombre de réponses

$$\underline{R} = 1$$

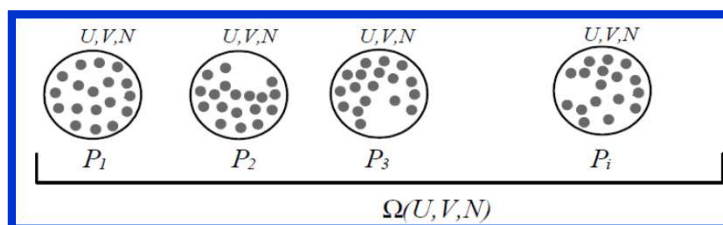
$$\underline{R} = 2$$

$$\underline{R} = 4$$

$$\underline{R} = 8$$

$$\underline{R} = 16$$

$$\text{Nombre de questions : } Q(R) = \frac{\log R}{\log 2}$$



$$\text{Nombre de questions} = S/k_B$$

Energie

Mécanicien

$$E = H(p, q)$$

$$dE = \dot{q} dp - \dot{p} dq$$

Micro et macro → cinétique potentielle

Physicien

$$E = \sum_i P_i \varepsilon_i$$

$$dE = \sum_i P_i d\varepsilon_i + \sum_i \varepsilon_i dP_i$$

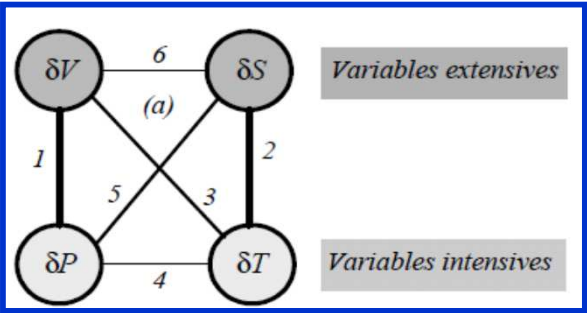
travail chaleur

Thermodynamicien

$$E = U(S, V, N, Q, \dots)$$

$$dE = TdS - pdV + \phi dQ + (\Sigma) \mu dN + \mathbf{V} \cdot d\mathbf{P} + \mathbf{\Omega} \cdot d\mathbf{L} + \mathbf{E} \cdot d\mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} + \dots$$

Cinétique micro Potentielle moyen macro Potentielle micro écranté Champ moyen macro



Le potentiel chimique est à la température ce que l'énergie cinétique est à l'énergie potentielle

$$dE = TdS - pdV + \mu dN + \dots$$

$\frac{1}{40} \text{ eV} \rightarrow 300 \text{ K}$

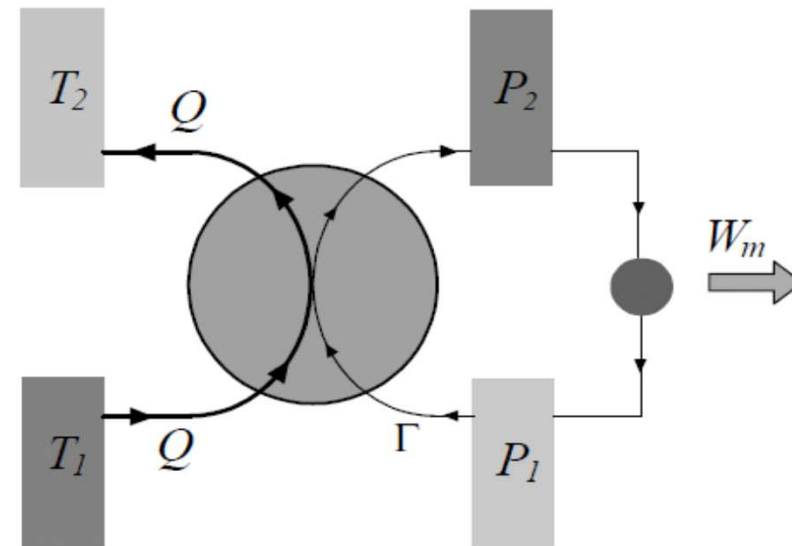
Liaisons Faibles → Transport
Liaisons Fortes → Réactivité

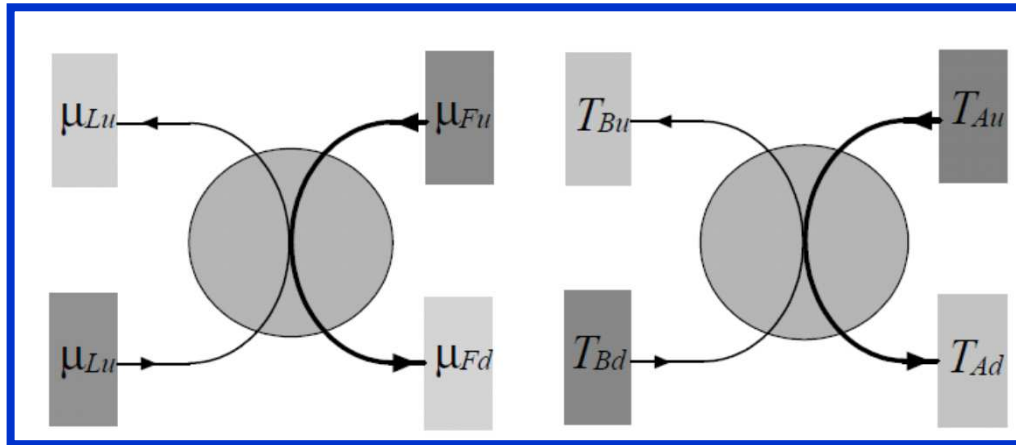
$$dE = TdS - pdV + \phi dQ + (\Sigma) \mu dN + \mathbf{V} \cdot d\mathbf{P} + \mathbf{\Omega} \cdot d\mathbf{L} + \mathbf{E} \cdot d\mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} + ..$$

Machine de conversion

2 gradients d'intensité + 2 flux d'extensité

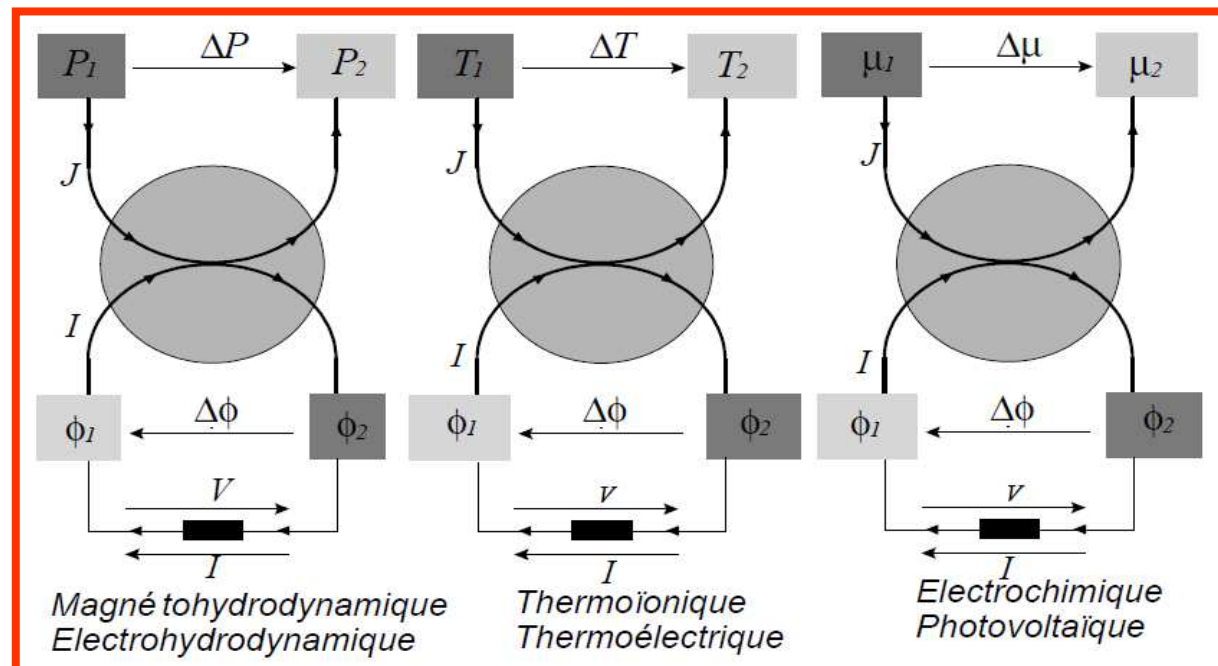
- (i) les gradients de potentiel mécanique gz ,
- (ii) les gradients de potentiel électrique ϕ ,
- (iii) les gradients de pression P ,
- (iv) les gradients de température T et
- (v) les gradients de potentiel chimique μ .





$$dE = TdS - pdV + \phi dQ + (\Sigma) \mu dN + \mathbf{V} \cdot d\mathbf{P} + \mathbf{\Omega} \cdot d\mathbf{L} + \mathbf{E} \cdot d\mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} + ..$$

64 machines de conversion

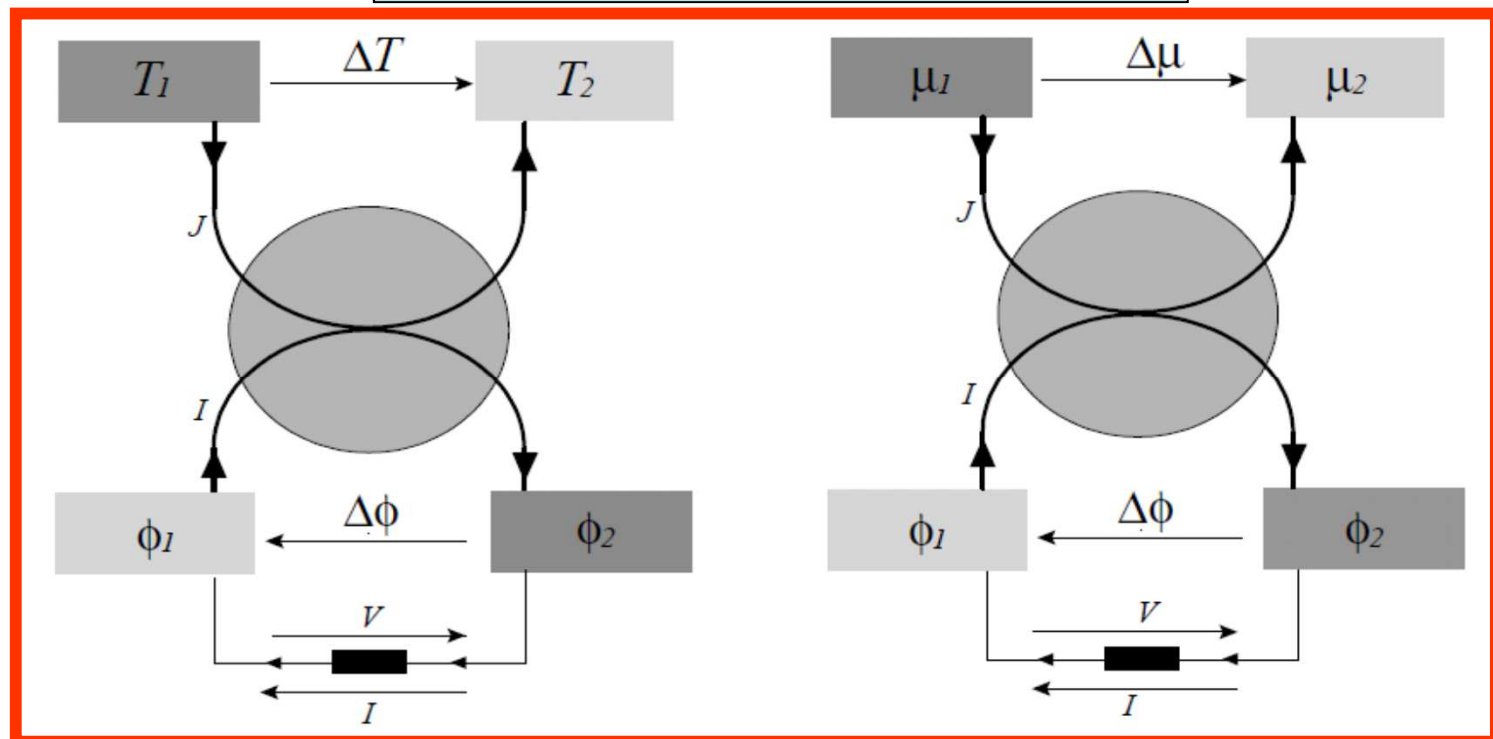


$$dE = TdS - pdV + \phi dQ + (\Sigma) \mu dN + \mathbf{V} \cdot d\mathbf{P} + \mathbf{\Omega} \cdot d\mathbf{L} + \mathbf{E} \cdot d\mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} + ..$$

50 Dispositifs électro-mécaniques

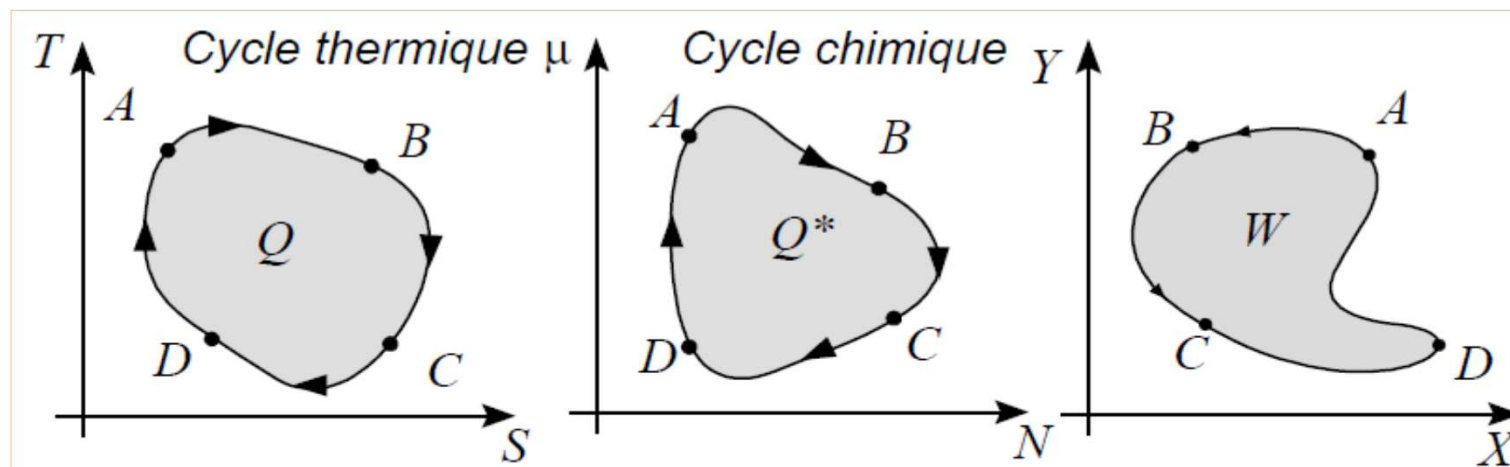
Thermique
Carnot

Chimique
Van't Hoff



Machine de conversion

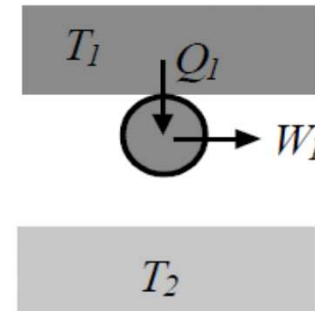
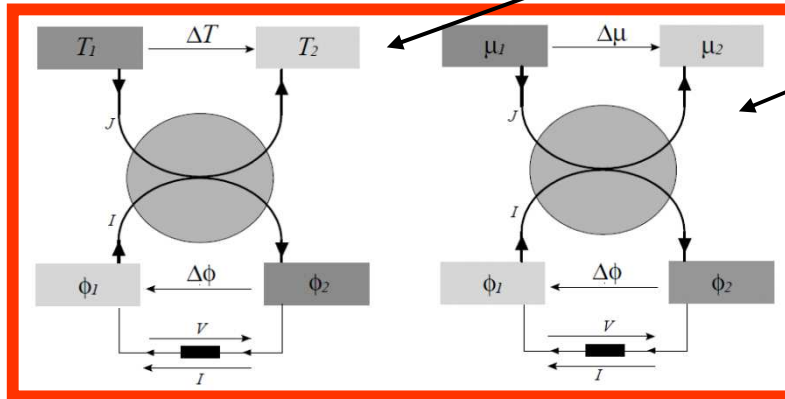
2 gradients d'intensité + 2 flux d'extensité



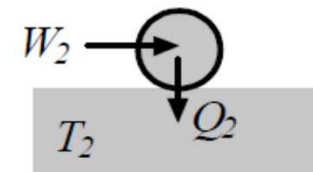
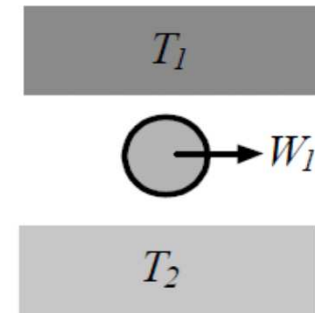
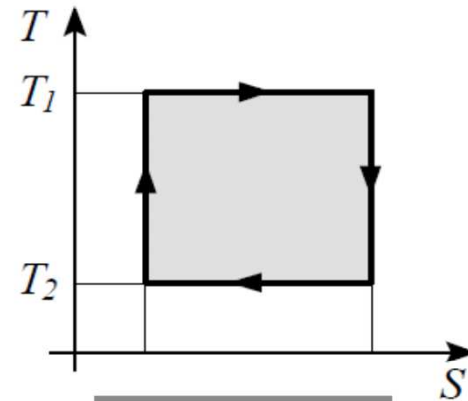
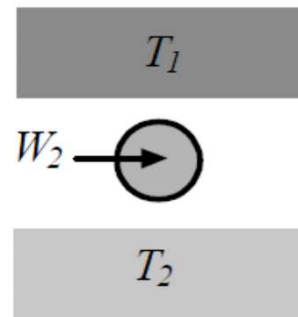
$$\oint d_e U = 0 \rightarrow Q = \oint T dS_e = -W = - \oint Y dX$$

$$\oint d_e U = 0 \rightarrow Q^* = \oint \mu dN_e = -W = - \oint Y dX$$

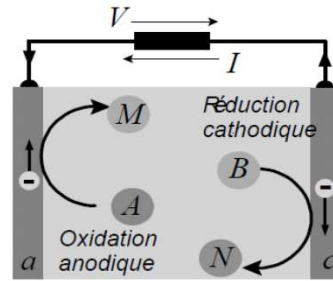
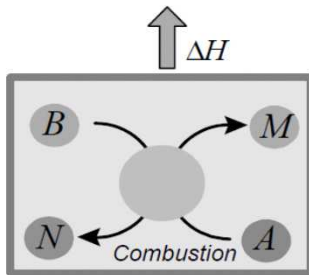
Carnot et Van't Hoff



$$\eta_{Carnot} \equiv \frac{W_1 - W_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



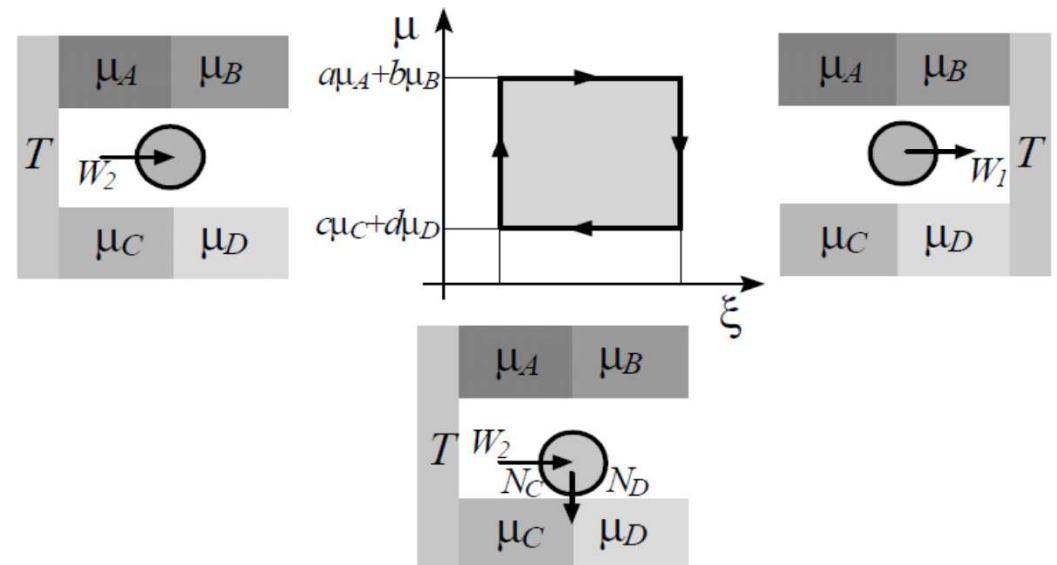
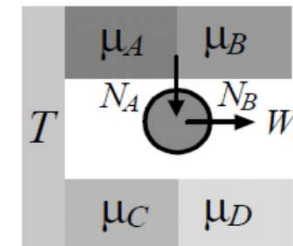
Cycle de Carnot



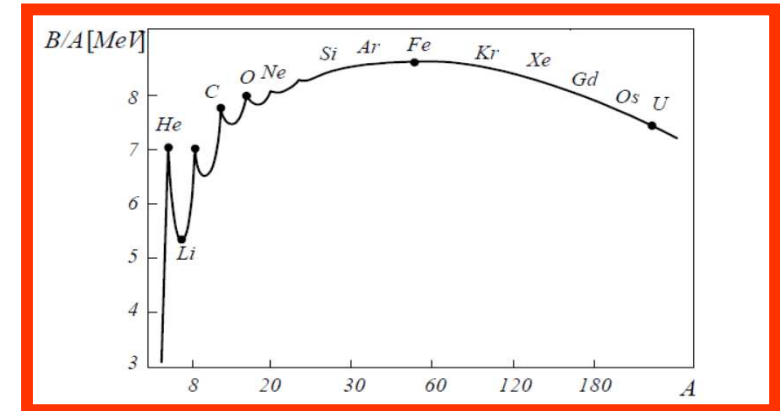
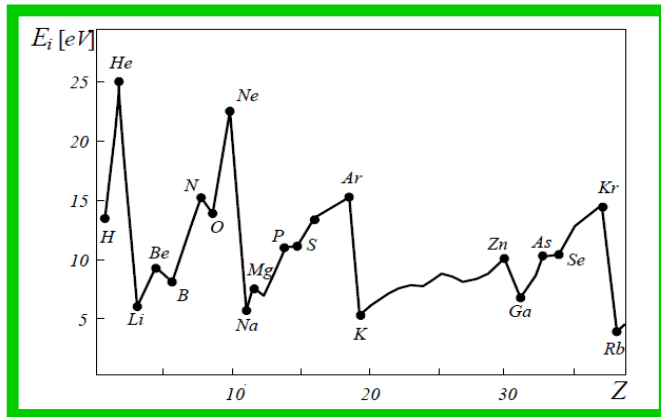
$$aA + bB \rightleftharpoons cC + dD \rightarrow \xi \equiv \frac{N_A}{a} = \frac{N_B}{b} = -\frac{N_C}{c} = -\frac{N_D}{d}$$

$$\theta_{Van'tHoff} \equiv \frac{W_1 - W_2}{\Delta Q_{aA+bB \rightarrow cC+dD}} = \frac{\Delta G_{aA+bB \rightarrow cC+dD}}{\Delta H_{aA+bB \rightarrow cC+dD}} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H}$$

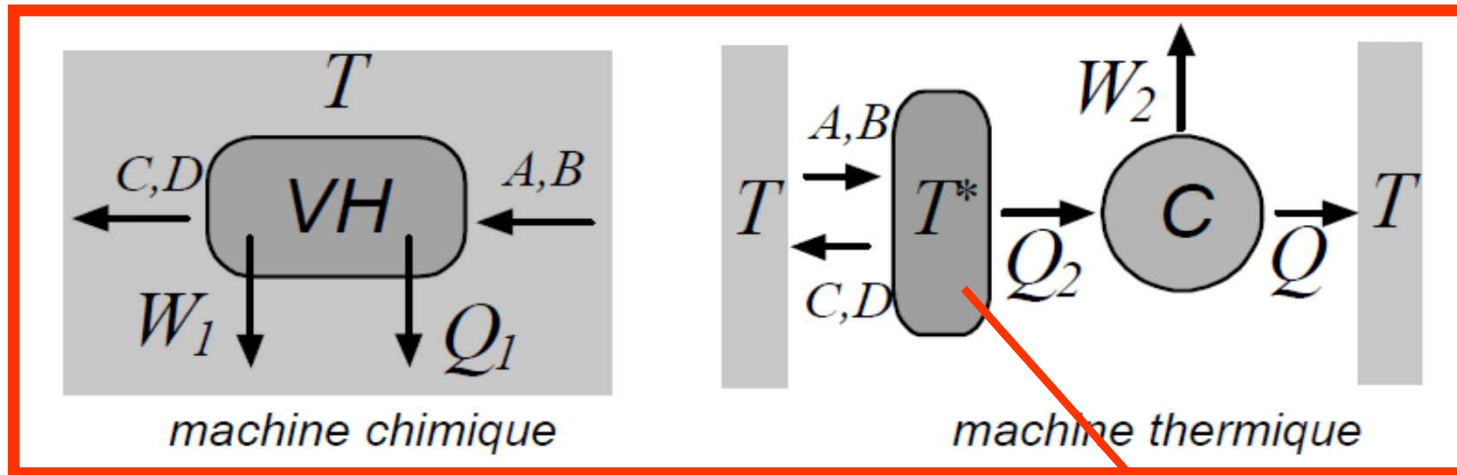
Cycle de Van't Hoff



Carnot vs Van't Hoff : T^*

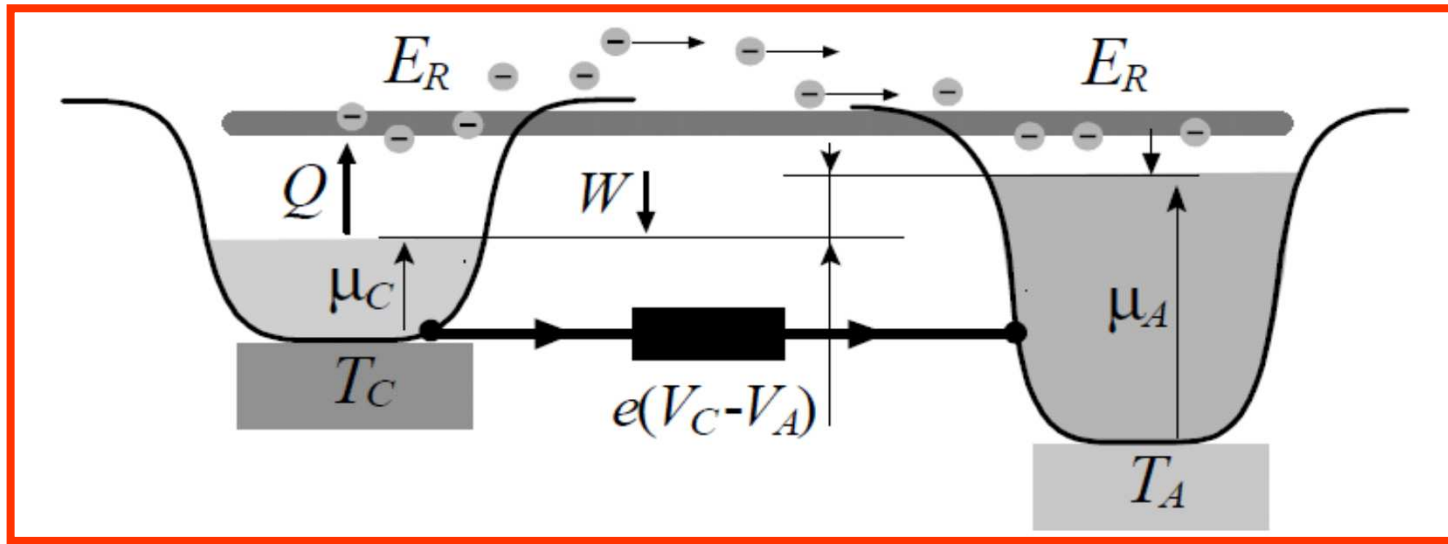


- (i) un machine chimique de Van't Hoff (VH) à la température T , rejetant la quantité de chaleur Q_1 et fournissant le travail W_1 ,
- (ii) une machine thermique de Carnot (C) dont le cycle est entretenu entre une source chaude maintenue à la température T^* , constituée par une chaudière chauffée par la réaction exothermique $A + B \rightarrow C + D$, et une source froide à la température T .



$$\Delta G^* = 0 \rightarrow T^*(T) \equiv \frac{\Delta H(T)}{\Delta S(T)}$$

$$\begin{aligned} \theta_{Van'tHoff} &\equiv \frac{W_1}{Q_1 + W_1} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H}, \\ \eta_{Carnot} &\equiv \frac{-W_2}{Q_2} = 1 - \frac{T}{T^*} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H}, \end{aligned}$$



Isentropique :
$$\frac{1}{\exp\left(\frac{E_R - \mu_C}{k_B T_C}\right) + 1} = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_R - \mu_A}{k_B T_A}\right) + 1}$$

$$E = \sum_i P_i \varepsilon_i$$

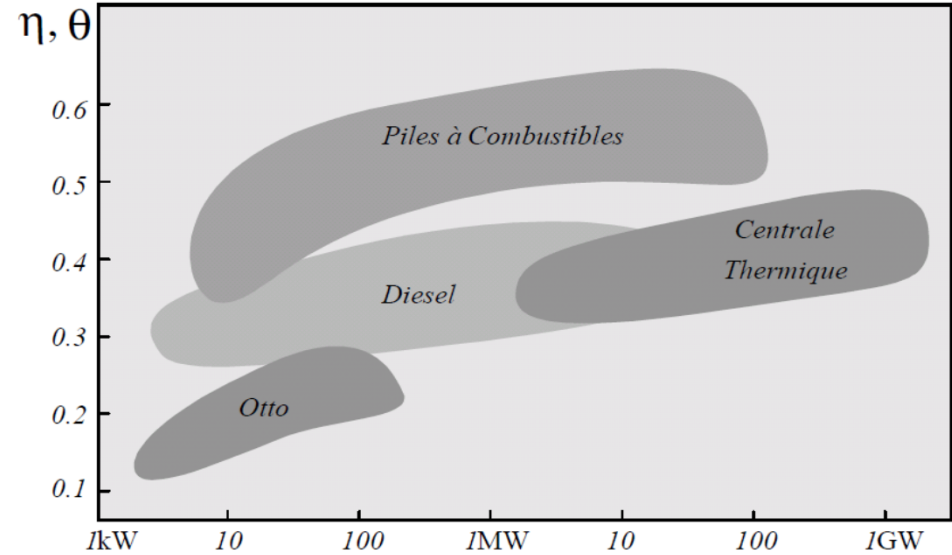
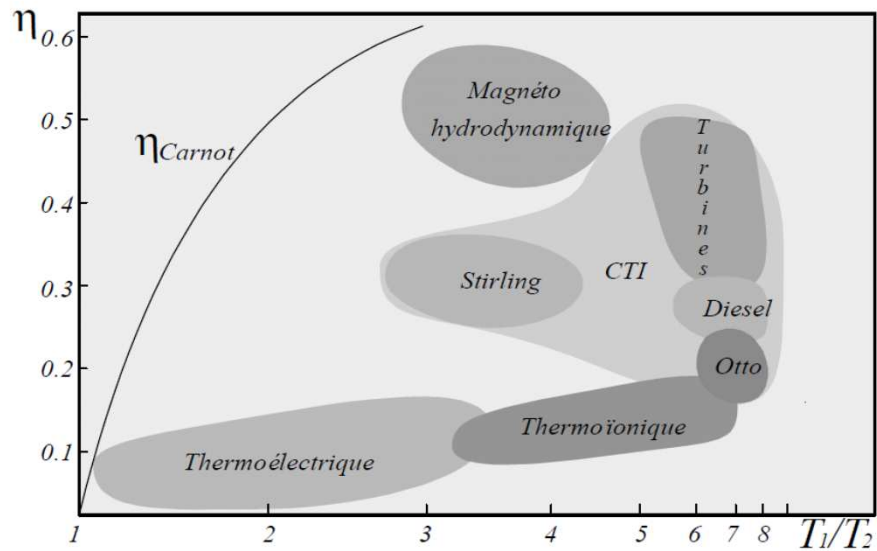
$$dE = \sum_i P_i d\varepsilon_i + \sum_i \varepsilon_i dP_i$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_A}{T_C},$$

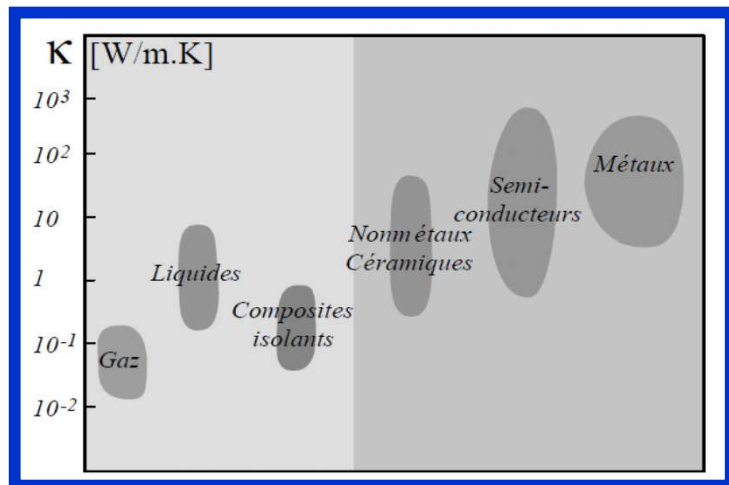
$$\theta_{Van'tHoff} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\mu_A - \mu_C}{E_R - \mu_C}.$$

Travail : $\Delta G = e(V_C - V_A) = \mu_A - \mu_C,$
 Chaleur : $\Delta H = E_R - \mu_C.$

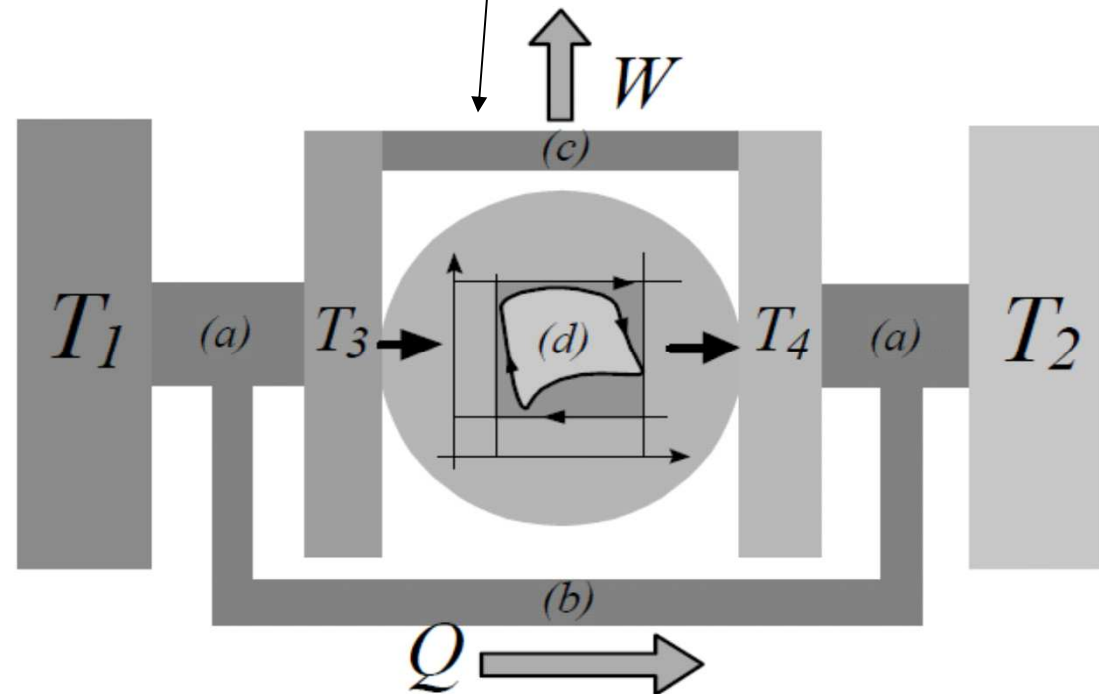
$$\frac{E_R - \mu_C}{E_R - \mu_A} = \frac{T_C}{T_A} \rightarrow \theta_{Van'tHoff} = \frac{(E_R - \mu_C) - (E_R - \mu_A)}{E_R - \mu_C} = \eta_{Carnot}$$



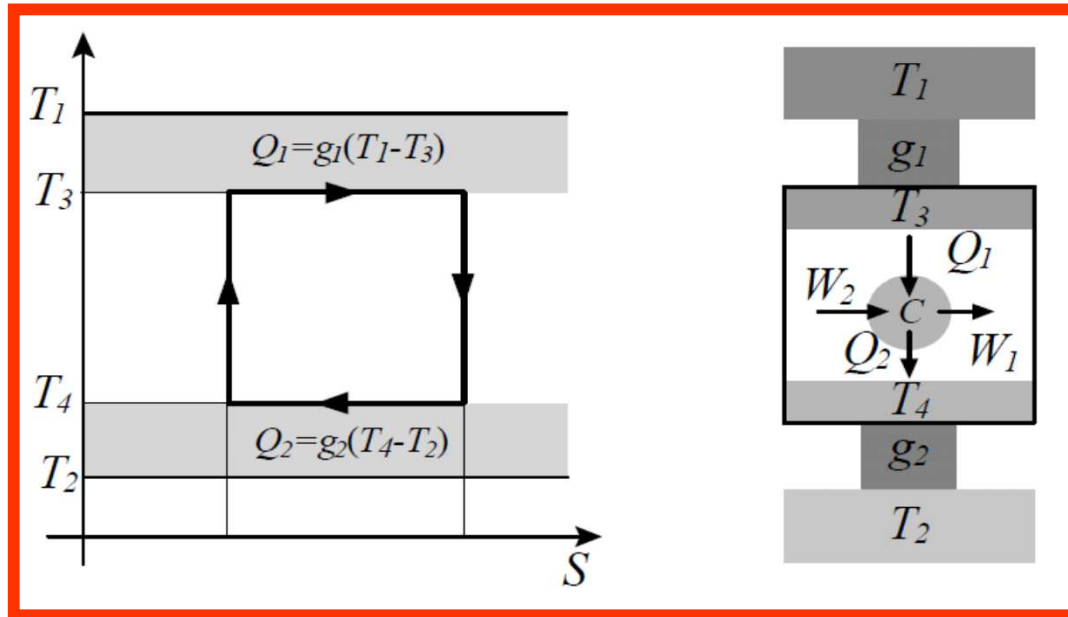
$\eta = \theta \longrightarrow$ Thermique ou chimique ?



Conducteur	$10^{-7} \times \eta$ [S.m ⁻¹]	Isolant	$10^{12} \times \eta$ [S.m ⁻¹]
Aluminium	3.12	Diamant	100
Cuivre	6.1	Ebonite	0.05
Nichrome	0.09	Mica	11



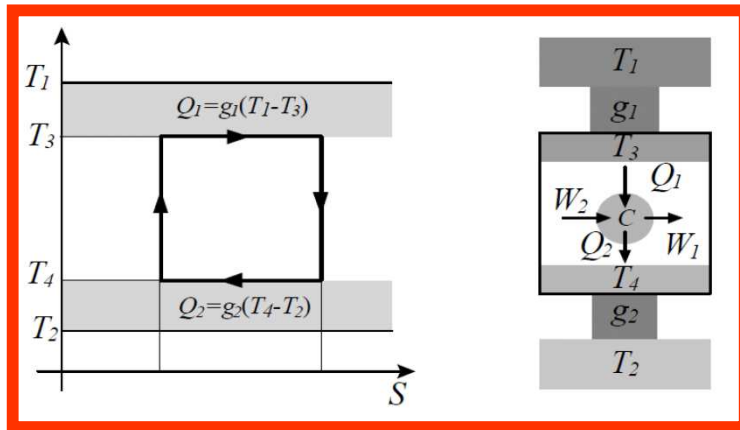
Endoréversibilité



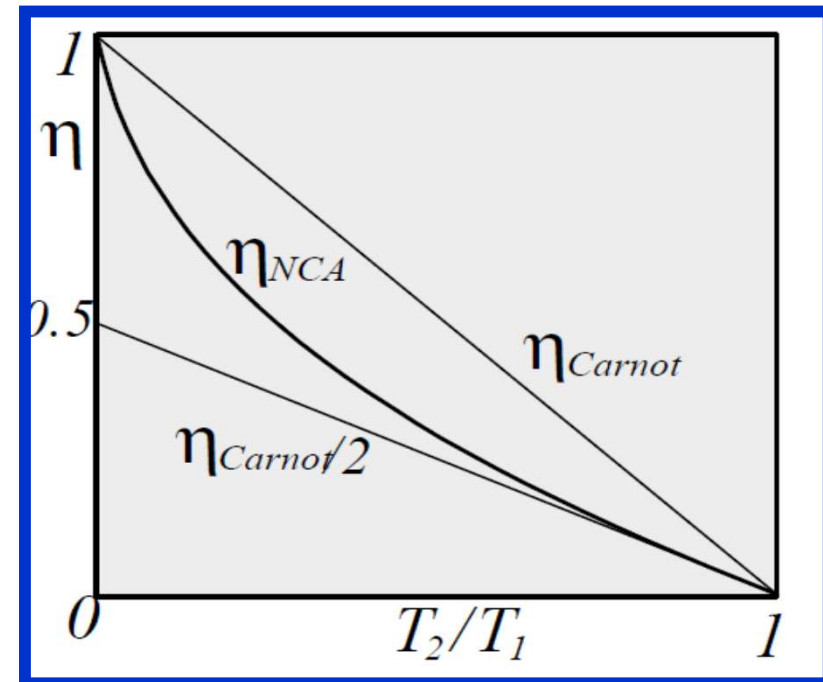
$$\oint_{\text{Carnot}} dS_e = 0 \rightarrow g_1 \frac{(T_1 - T_3)}{T_3} = g_2 \frac{(T_4 - T_2)}{T_4}$$

$$\eta \equiv 1 - T_4/T_3$$

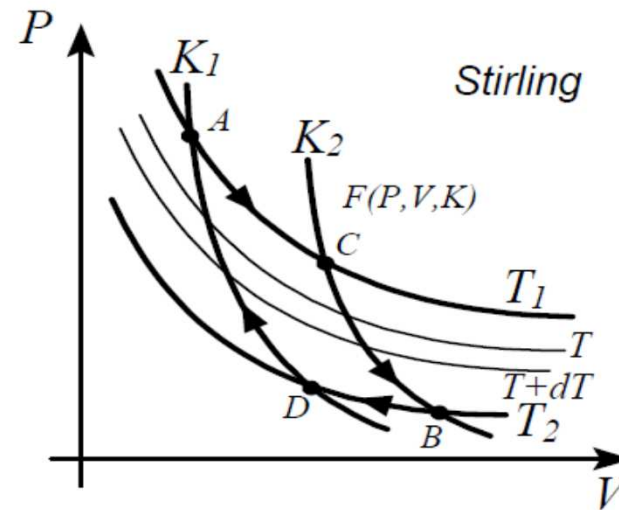
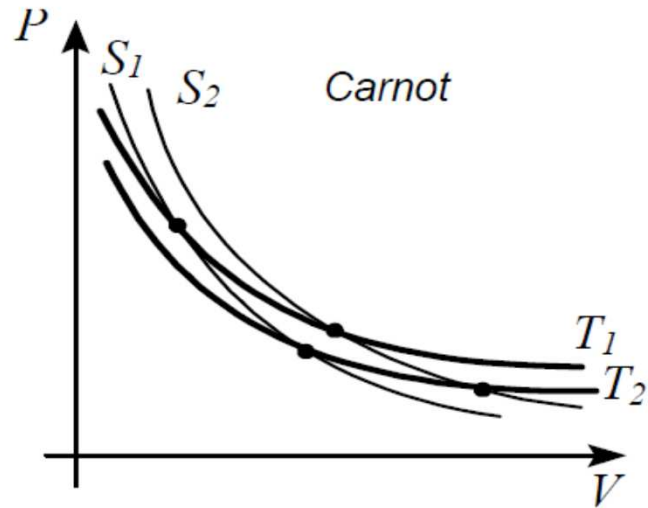
$$\frac{d(W_1 - W_2)}{d\eta} = 0 \rightarrow T_1 \eta^2 - 2T_1 \eta + T_1 - T_2 = 0$$



$$\eta_{NCA} = 1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \approx \frac{\eta_{Carnot}}{2}$$

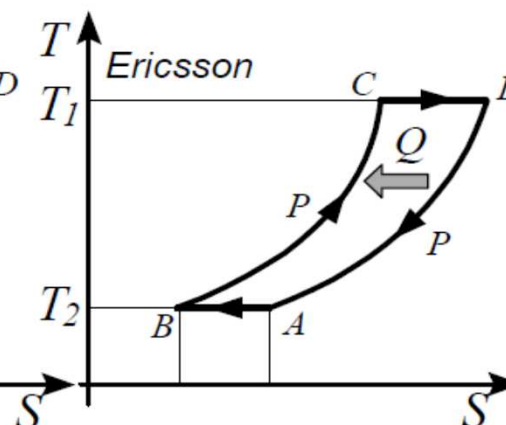
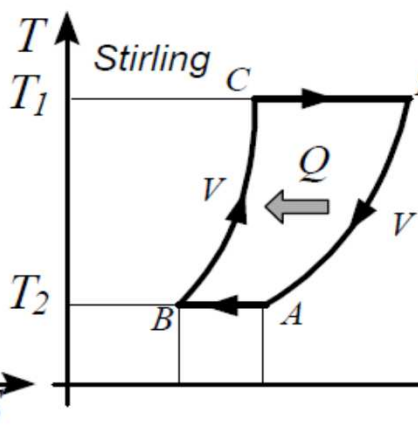
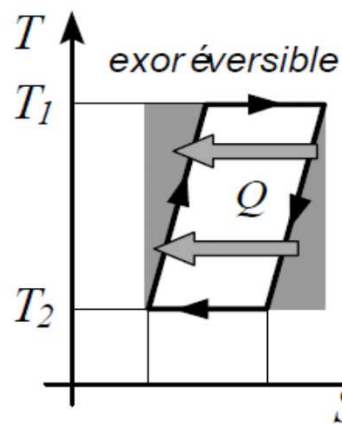


Exoréversibilité

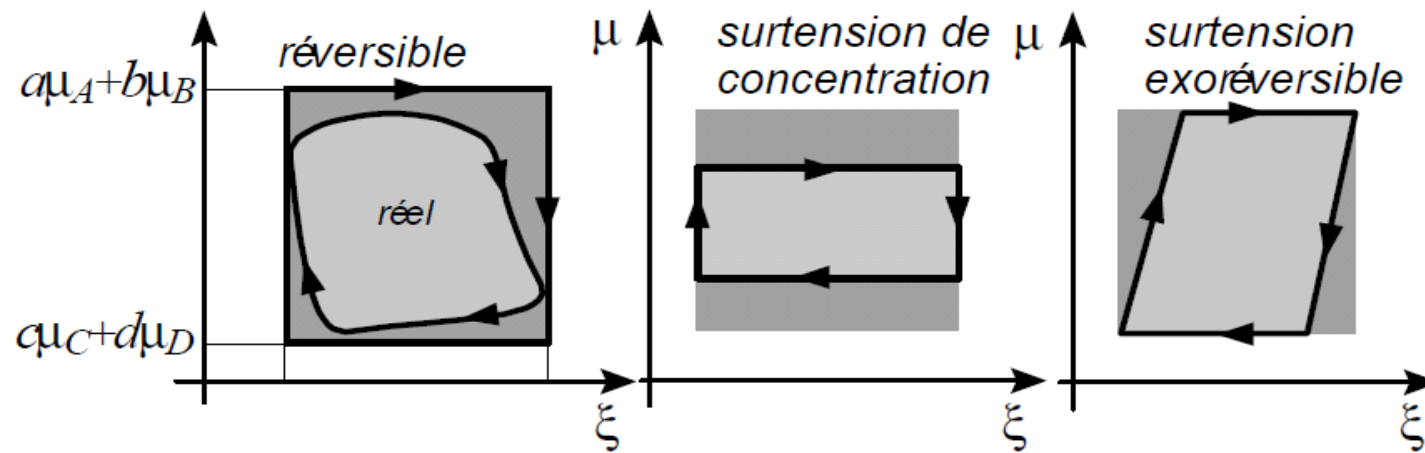


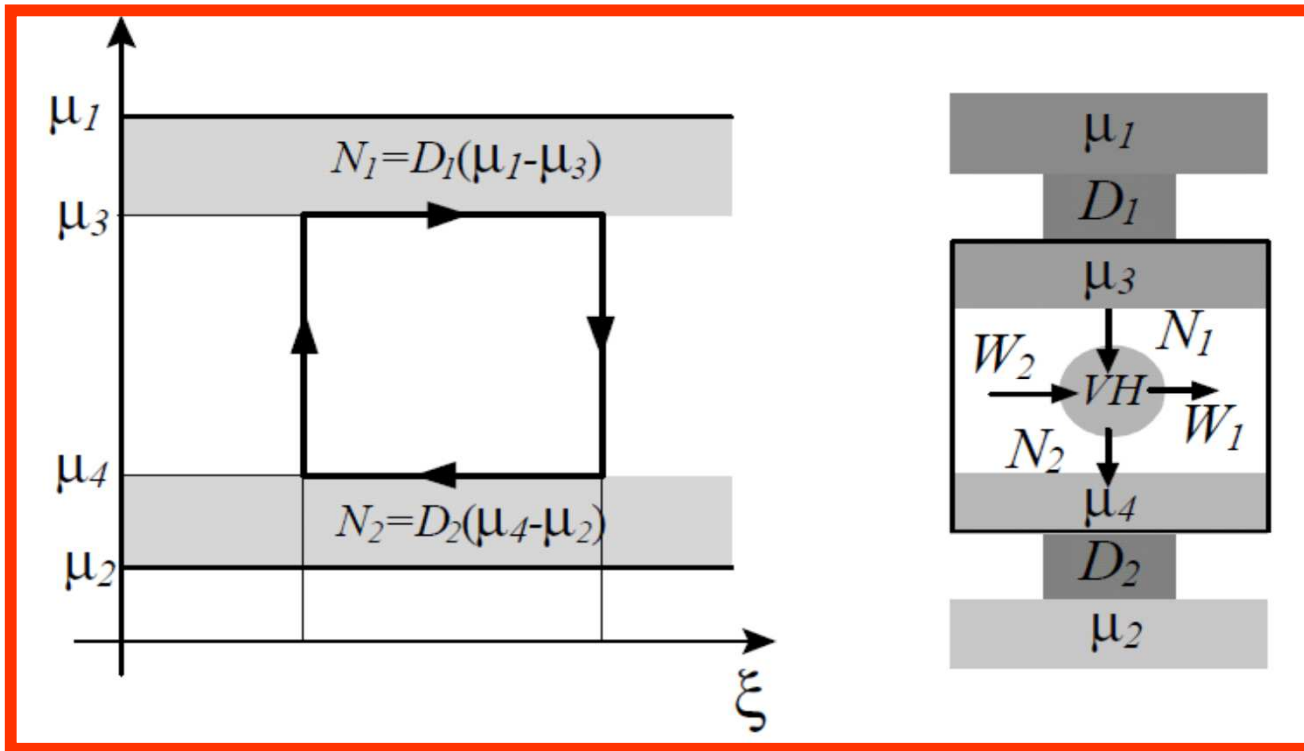
$$\text{Isodiabatiques : } F\left(\frac{P}{K}, KV\right) = 0$$

$$\text{Isodiabatique : } C_V \left(\frac{dP}{P} - \frac{dP'}{P'} \right) = C_P \left(\frac{dV'}{V'} - \frac{dV}{V} \right)$$



- Cycles endo/exo-reversibles chimiques



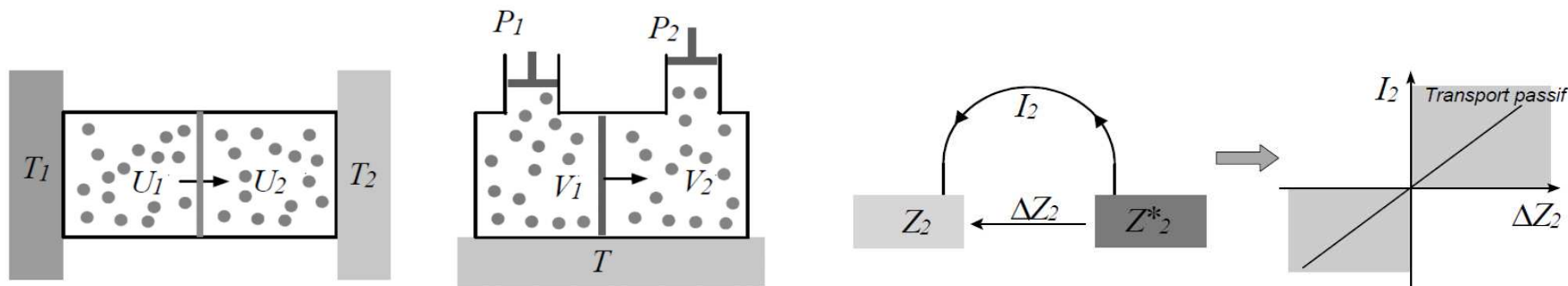


$$\theta_{Van'tHoff} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\Delta H} > \theta = \frac{\mu_3 - \mu_4}{\Delta H}$$

$$\text{Rendement endoréversible chimique : } \theta_{opt} \equiv \frac{W^*}{N^* \Delta H} = \frac{\theta_{Van'tHoff}}{2}$$

Flux et Cycles

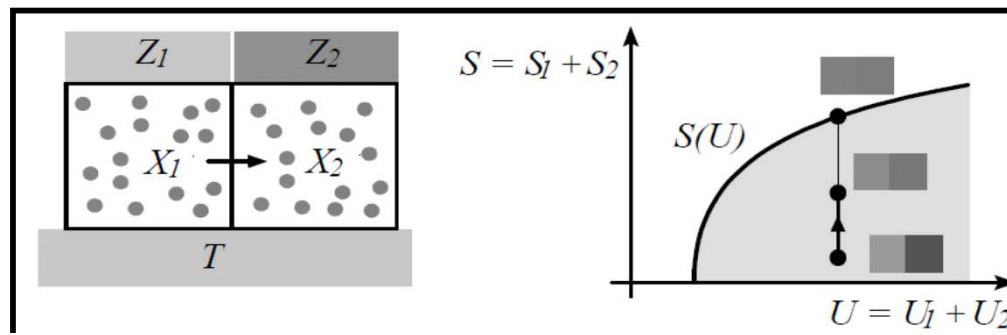
Machine de conversion $\longrightarrow$ 2 gradients d'intensité + 2 échanges d'extensité



$$\begin{aligned} \text{Flux thermodynamique} &: I \equiv \frac{dX_2}{dt} = -\frac{dX_1}{dt}, \\ \text{Affinité thermodynamique} &: \Delta Z \equiv Z_2 - Z_1. \end{aligned}$$

Flux simples

$$\begin{aligned} \text{Echange} &: \frac{d_e X}{dt} \equiv - \iint_{\Sigma} \mathbf{J}_x \cdot d\Sigma, \\ \text{Production} &: \frac{d_i X}{dt} \equiv \iiint_V \sigma_x dV. \end{aligned}$$



$$\text{Conservation} : d_i X = d_e X_1 + d_e X_2 = 0,$$

$$\text{Evolution} : d_i S = d_e S_1 + d_e S_2 = Z_1 dX_1 + Z_2 dX_2 \geq 0$$

$$\text{Production d'entropie: } \frac{d_i S}{dt} \left[\frac{\text{J}}{\text{K.s}} \right] = I \left[\frac{\text{X}}{\text{s}} \right] \cdot \Delta Z \left[\frac{\text{J}}{\text{X.K}} \right]$$

$$\text{Entropie} : \quad \mathbf{J}_s = \sum_j Z_j \mathbf{J}_{x_j} = \frac{\mathbf{J}_u}{T} - \frac{\mu}{T} \mathbf{J}_n - \frac{\phi}{T} \mathbf{J}_e - \frac{P}{T} \mathbf{J}_V + \dots$$

$$\text{Energie} : \quad \mathbf{J}_u = \sum_i Y_i \mathbf{J}_{x_i} = T \mathbf{J}_s + \mu \mathbf{J}_n + \phi \mathbf{J}_e + P \mathbf{J}_V + \dots$$

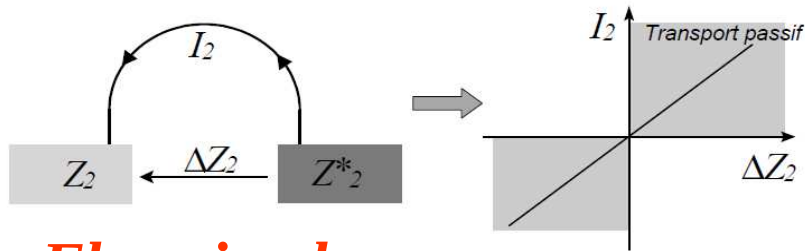
(de Groot vs Callen)

Flux couplés

$$\text{Coefficients cinétiques linéaires : } \mathbf{J}_{x_i} \equiv \sum_j L_{ij} \nabla Z_j$$

	$\nabla \frac{1}{T}$	$\frac{\nabla P}{T}$	$\frac{\nabla \phi}{T}$	$\frac{\nabla \mu}{T}$
$\mathbf{J}_h$	Loi de Fourier	Joule-Thomson	Effet Peltier	Effet Dufour
$\mathbf{J}_v$	Thermo-osmose	Loi de Darcy	Electro-osmose	Osmose
$\mathbf{J}_e$	Effet Seebeck	Courant d'Ecoule.	Loi d'Ohm	Courant de Diff.
$\mathbf{J}_n$	Effet Soret	Osmose inverse	Electrophorèse	Loi de Fick

	$\nabla \frac{1}{T}$	$\frac{\nabla P}{T}$	$\frac{\nabla \phi}{T}$	$\frac{\nabla \mu}{T}$
$\mathbf{J}_h$	Fourier 1822	Joule-Thomson 1852	Peltier 1834	Dufour 1873
$\mathbf{J}_v$	Reynolds 1879	Darcy 1846,	Reuss 1808	Nollet 1748
$\mathbf{J}_e$	Seebeck 1822	Quinke 1859	Ohm 1826	Dorn 1878
$\mathbf{J}_n$	Soret 1880	Knudsen 1907	Reuss 1808	Fick 1855



Flux simples

Flux couplés optimaux (q,L)

$$\text{Transport couplé : } \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta Z_1 \\ \Delta Z_2 \end{pmatrix}$$

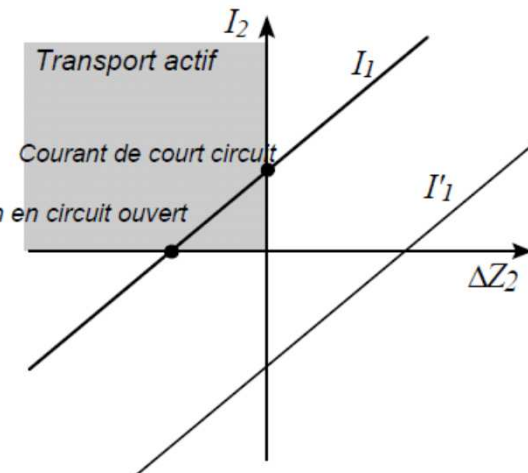
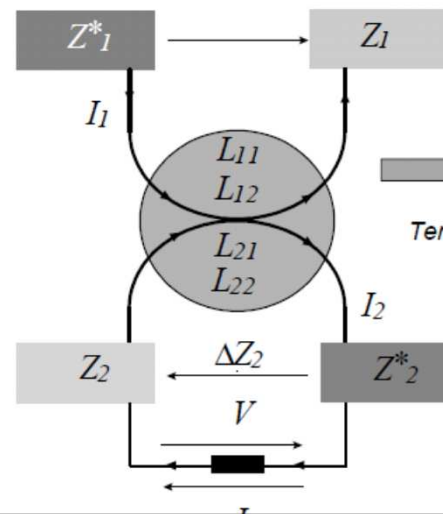
Couplage : $q \equiv \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} < 1$,

Asymétrie : $L \equiv \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}}$,

Transfert : $\delta \equiv \frac{\Delta Z_2}{\Delta Z_1}$.

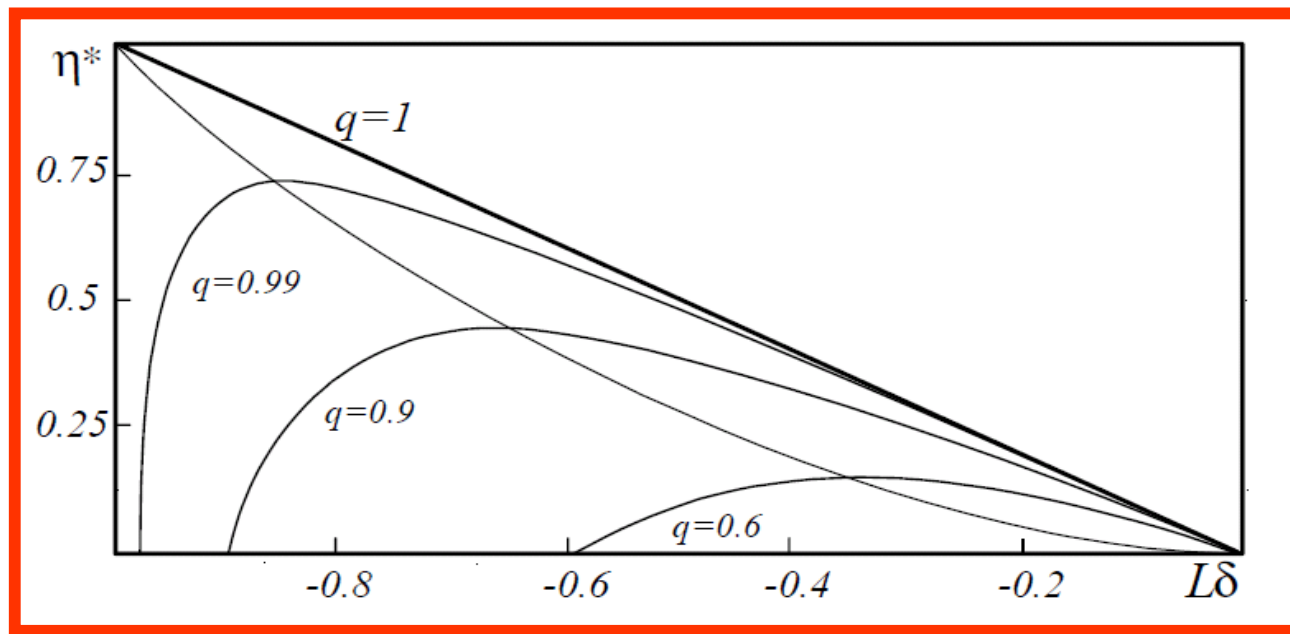
Flux de variables extensives

Gradients de variables intensives



Flux couplés

$$\text{Efficacité : } \eta^* \equiv -\frac{I_2 \Delta Z_2}{I_1 \Delta Z_1} \rightarrow \eta^* = -L \delta \frac{L\delta + q}{qL\delta + 1}$$



$$\sqrt{\eta_{Max}^*} = \frac{q}{1 + \sqrt{1 - q^2}}$$

$$\eta = \eta^* \frac{\Delta T}{T} = \eta^* \eta_{Carnot}$$

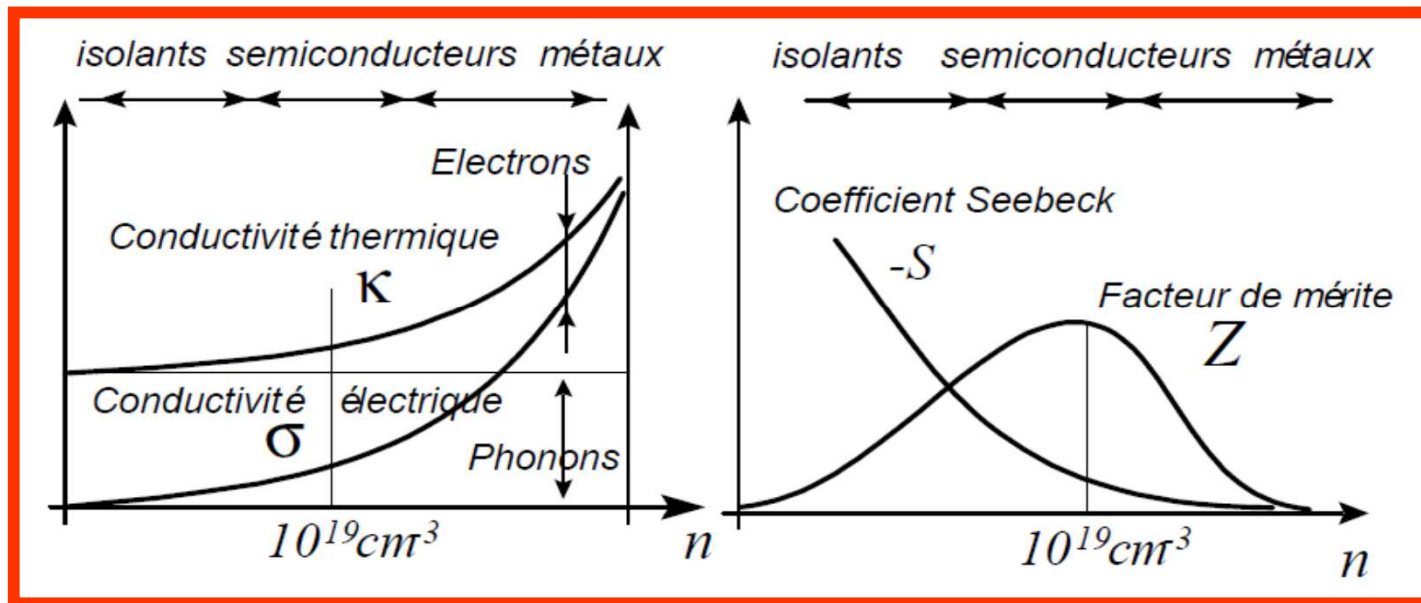
Couplage : $q \equiv \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} < 1$,

Asymétrie : $L \equiv \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}}$,

Transfert : $\delta \equiv \frac{\Delta Z_2}{\Delta Z_1}$.

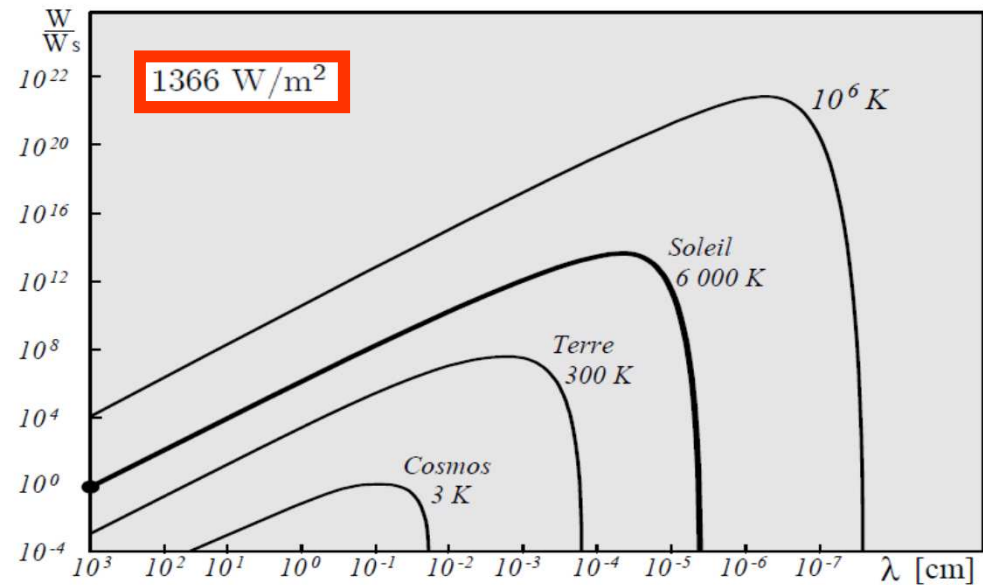
q ?

Facteur de qualité de Ioffe : $Z \equiv \frac{S^2}{RK}$



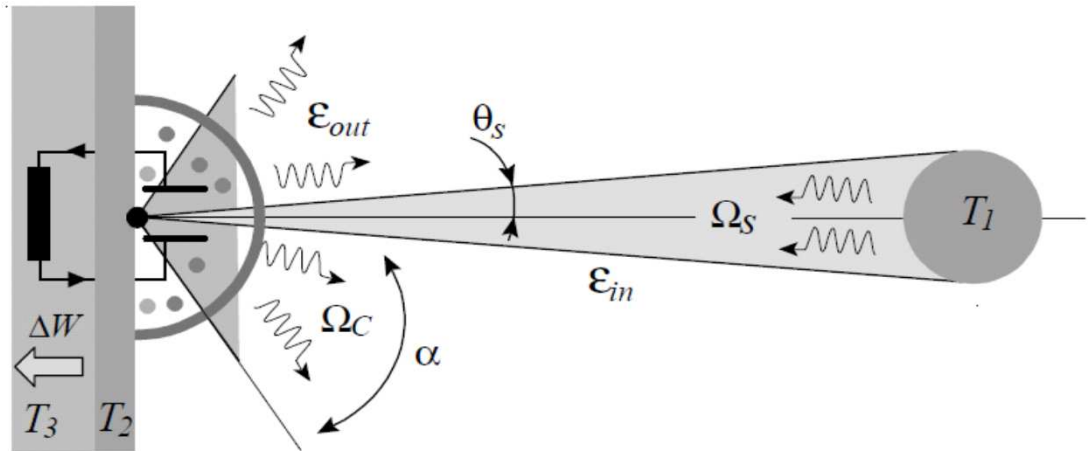
PV
FC

$$\begin{aligned} \text{Energie} &: u(T) = \frac{U}{V} = \frac{\pi^2 k_B^4}{15 \hbar^3 c^3} T^4 \\ \text{Entropie} &: s(T) = \frac{S}{V} = \frac{4\pi^2 k_B^4}{45 \hbar^3 c^3} T^3 \end{aligned}$$



$$\text{Production d'entropie} : \sigma_{out} - \sigma_{in} \approx k_B \log \left(\frac{\mathcal{E}_{out}}{\mathcal{E}_{in}} \right)$$

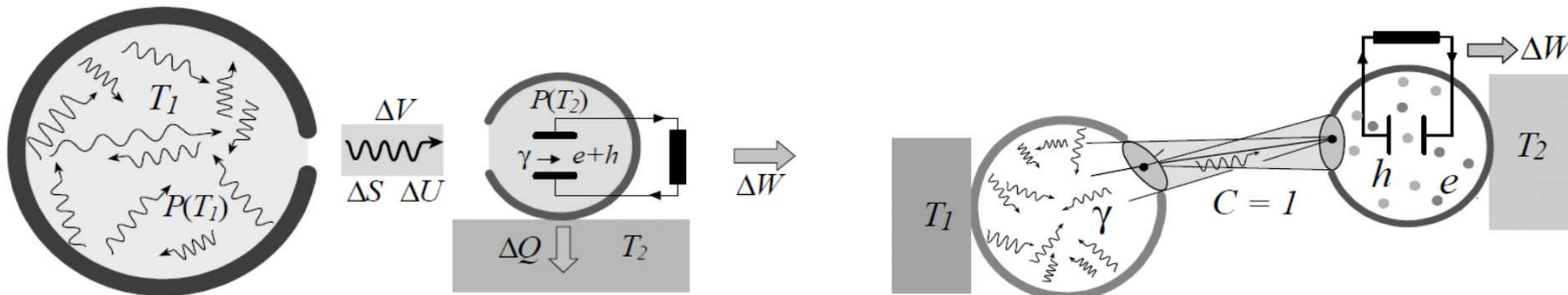
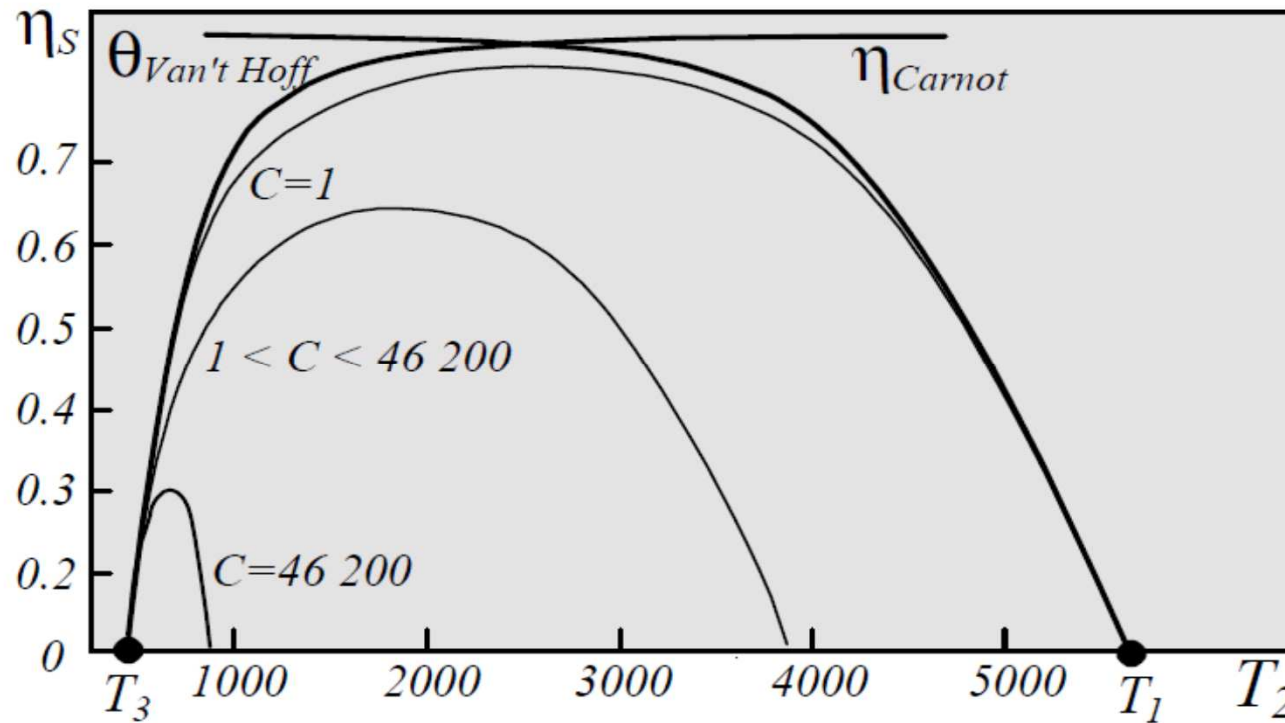
$$\frac{\mathcal{E}_{out}}{\mathcal{E}_{in}} = \frac{\int_0^\alpha \cos \theta d\Omega_C}{\int_0^{\theta_s} \cos \theta d\Omega_S} \approx \frac{2\pi \int_0^\alpha \cos \theta \sin \theta d\theta}{\Omega_S} = \frac{\pi \sin^2 \alpha}{\Omega_S}$$



$$\text{Facteur de concentration} : C \equiv \frac{\pi \sin^2 \alpha}{\Omega_S} \rightarrow C_{\text{libre}} = \frac{\pi}{6.8 \times 10^{-5}} = 46\,200$$

$$\text{Efficacité d'absorption} : \eta_a \approx \frac{dU_S - dU_C}{dU_S} = 1 - C \frac{T_2^4}{T_1^4}$$

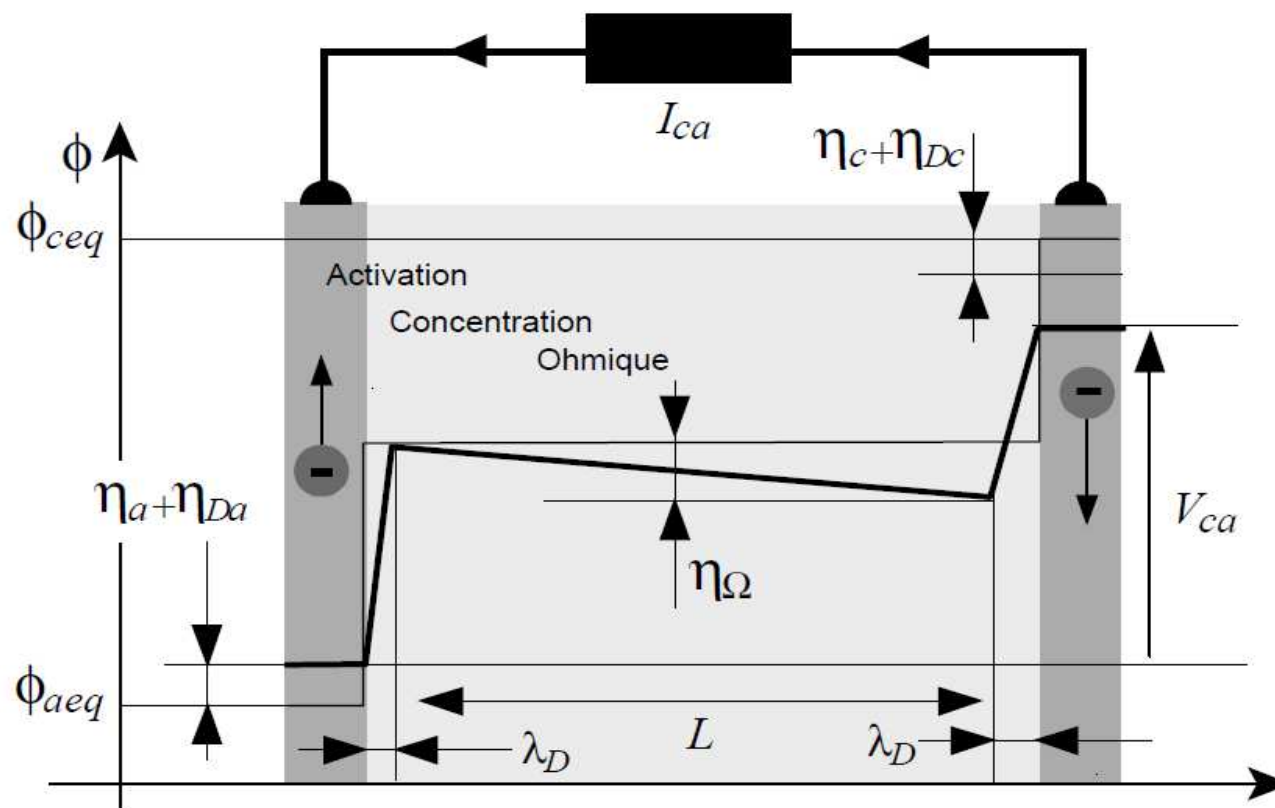
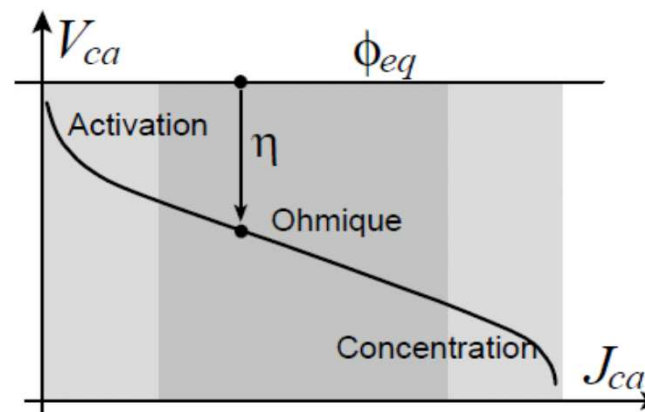
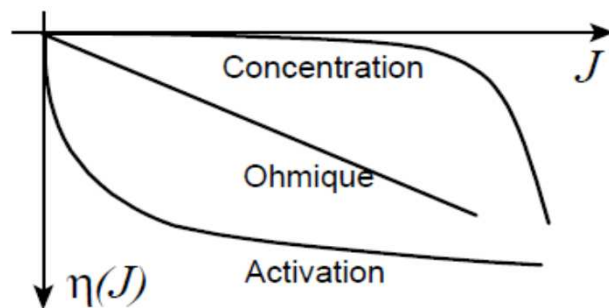
$$\text{Efficacité optimum : } \eta_S = \eta_a \eta_{Carnot} = \left(1 - C \frac{T_2^4}{T_1^4}\right) \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right)$$



$$\theta_{Van'tHoff} = \frac{\Delta G(\gamma \rightarrow e + h)}{\Delta U} \rightarrow \eta_{Landsberg} = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_2}{T_1} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4$$

Oxydation : $Red \xrightarrow{k_O} Ox + e$,

Réduction : $Ox + e \xrightarrow{k_R} Red$.

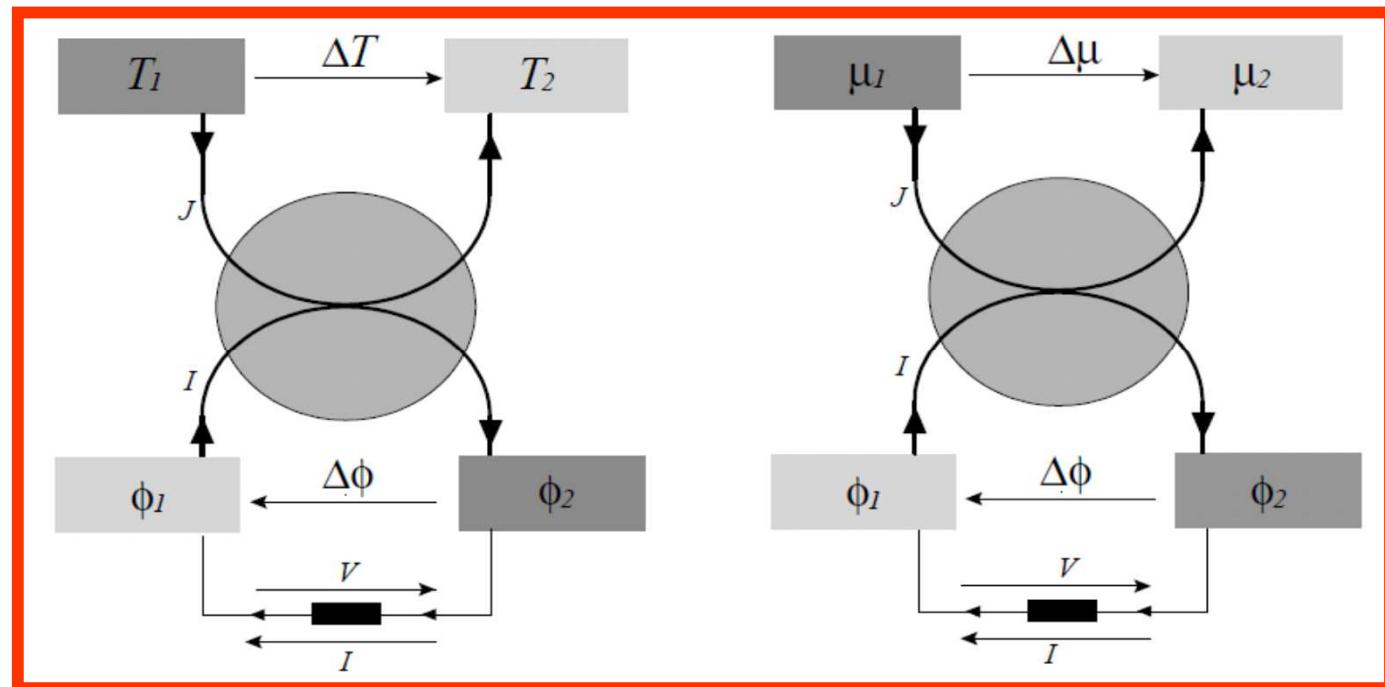


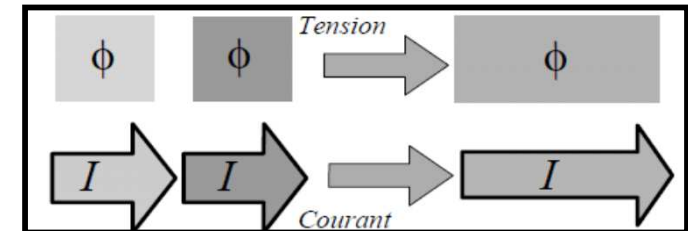
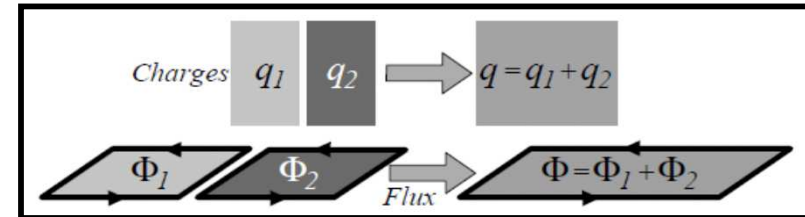
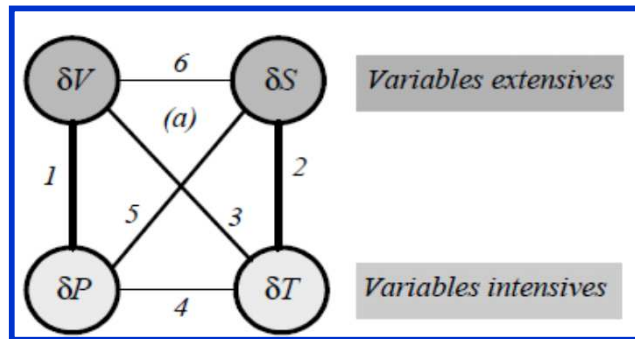
- Introduction (E,S)
- Intensités, Extensités, Cycles
- Cycles endo/exo-reversibles thermiques
- Cycles endo/exo-reversibles chimiques
- Flux et cycles
- Flux couplés optimaux (q,L)
- Carnot vs Van't Hoff, T^*
- PV
- FC

$$\eta = 1 - (T_F/T_H)^{1/2}$$

$$\theta = \Delta G/2\Delta H$$

Thermique Chimique





Energy Harvesting = Machine thermique filtré

