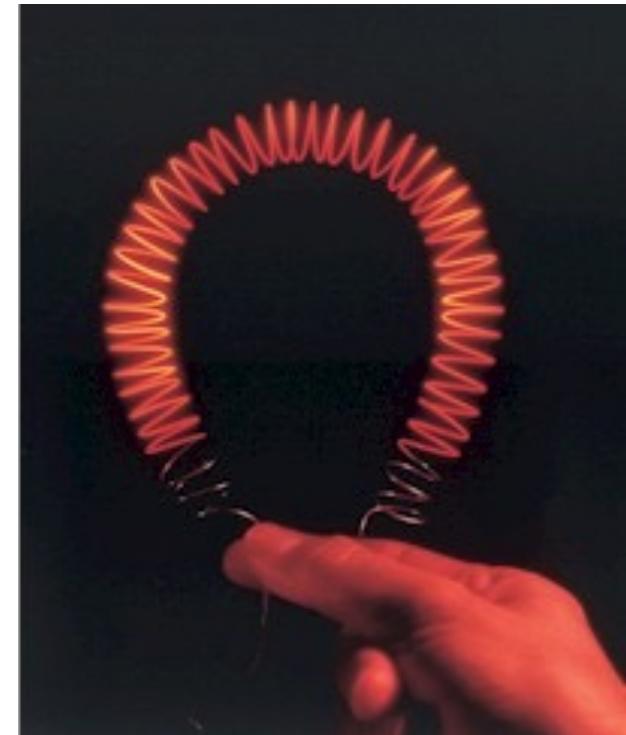


Thermique

Mesures de la température
Fours
Transfert de chaleur
Régulation de température



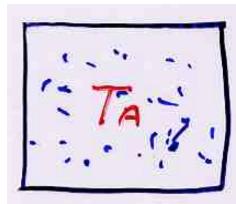
Mesures de la température

Température - variable intensive servant à décrire l'état d'un système
- mesure le degré d'agitation des molécules

- gaz parfait $\frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}kT$

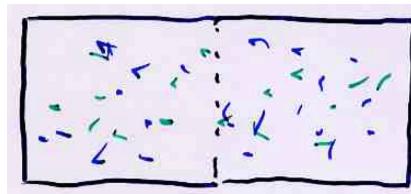
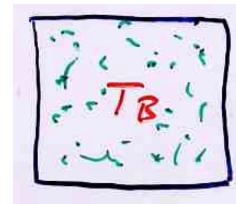
gaz A

$$\frac{1}{2}m_A\langle v_A^2 \rangle$$



gaz B

$$\frac{1}{2}m_B\langle v_B^2 \rangle$$



chocs entre molécules A et B

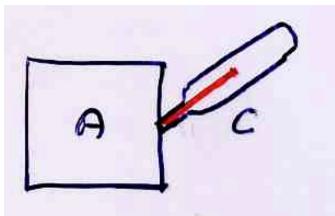
après un temps t $\frac{1}{2}m_A\langle v_A^2 \rangle = \frac{1}{2}m_B\langle v_B^2 \rangle$

$T_A = T_B$ équilibre thermique

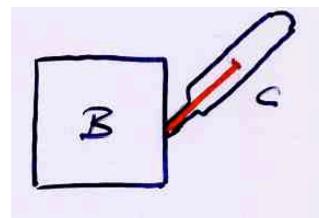
Principe zéro de la thermodynamique

Deux systèmes qui sont en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre thermique entre eux

→ usage du thermomètre



A en équilibre
avec C



B en équilibre
avec C



A en équilibre
avec B

Thermomètre indique sa température!

- choisir un système qui est sensible à la température
(dilatation, résistance électrique,...)
- choisir des points fixes d'étalonnage
(mélange eau – glace, ébullition de l'eau, ébullition de l'azote,...)
- loi de variation de la grandeur ($R = R_0 (1 + \alpha T)$)

Thermomètre à mercure

- système: une quantité de mercure de volume V
- propriété physique: dilatation thermique
- loi: variation linéaire de V

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha \cdot (T - T_0)$$

- calibration:

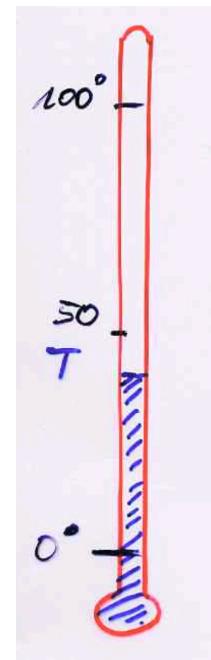
$$T=0, V=V_0 \Rightarrow T_0=0$$

$$T=100, V=V_{100} \Rightarrow \frac{V_{100}-V_0}{V_0} = \alpha \cdot 100$$

$$\alpha = \frac{V_{100}-V_0}{100 \cdot V_0}$$

$$\frac{V-V_0}{V_0} = \frac{V_{100}-V_0}{100 V_0} \cdot T$$

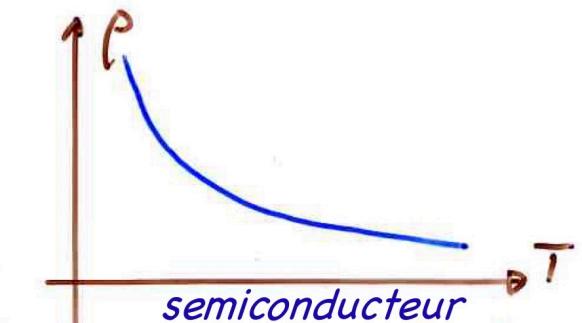
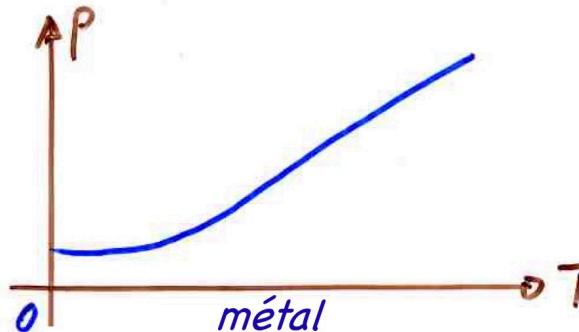
→ $T = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} \cdot 100(^{\circ}\text{C})$



Thermosonde ou thermomètre à résistance

- résistivité électrique

$$\rho = \rho(T)$$

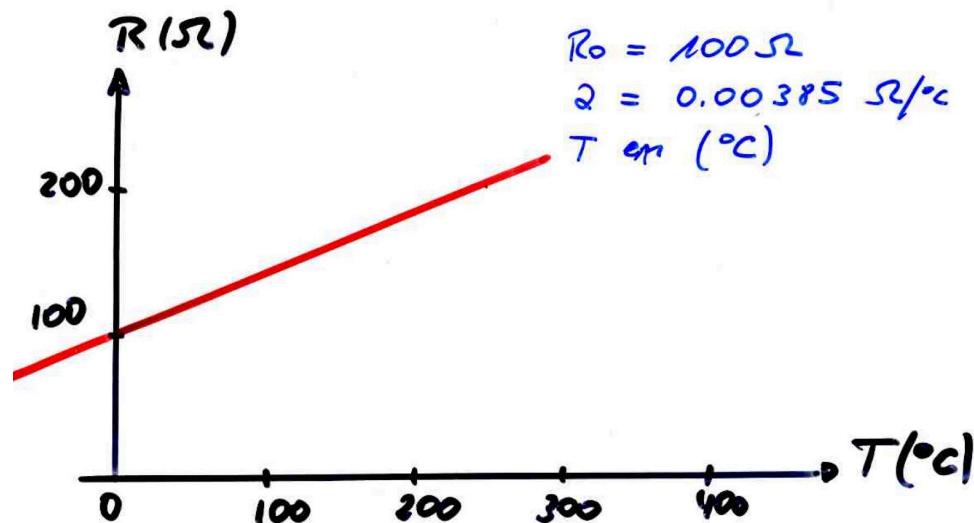


- sonde platine Pt100

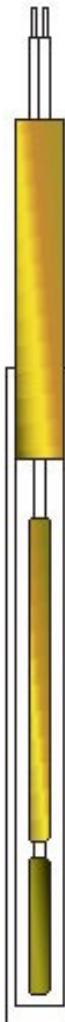


$$R = R_0(1 + \alpha T)$$

- stable, précis, linéaire



Sonde platine



The Probe

A probe is an assembly composed of an element, a sheath, a lead wire, and a termination or connection.

The Sheath

The sheath, a closed end tube, immobilizes the element, protecting it against moisture and the environment to be measured. The sheath also provides protection and stability to the transition lead wires from the fragile element wires.

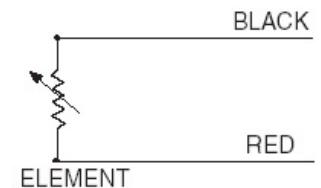
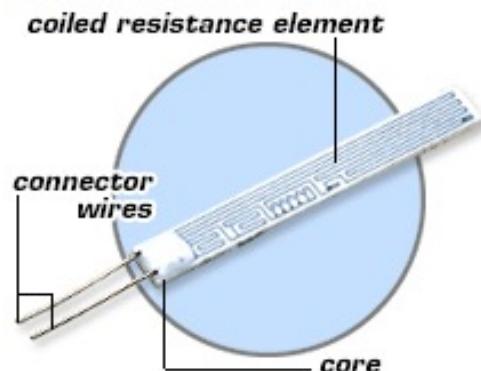
The Element

The standard OMEGA® RTD probe is made with a 100 ohm platinum European curve element ($a = 0.00385$).

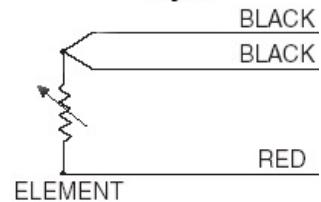
Temperature Rating

OMEGA's "PR" style RTD probe assemblies are rated for use in temperatures up to 600° C (1110° F). The maximum temperature rating available on special order is 750° C (1380° F).

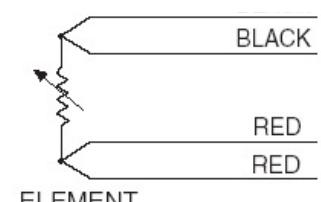
Typical RTD Design



Style 1



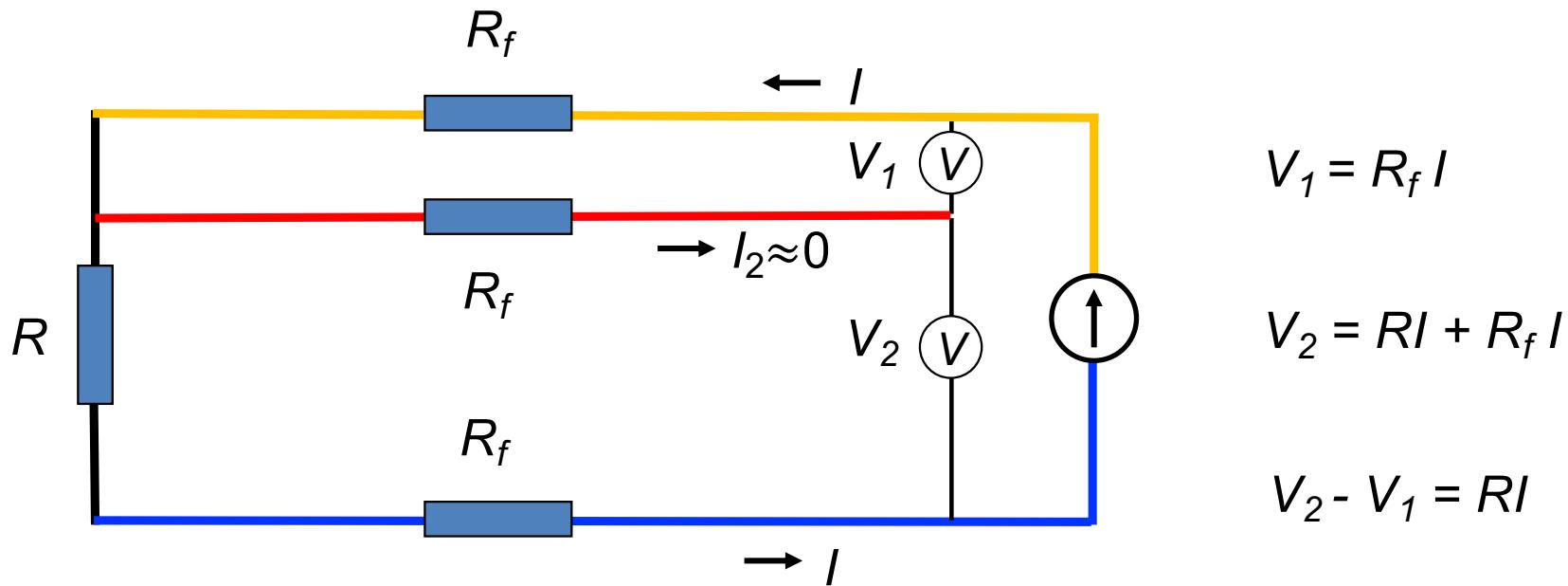
Style 2



Style 3

Lead configuration 2 (Standard) provides one connection to one end and two to the other end of the sensor. Connected to an instrument designed to accept three-wire input, compensation is achieved for lead resistance and temperature change in lead resistance. This is the most commonly used configuration.

Mesure de la résistivité sur 3 points



$$R_{voltmètre} \gg R \quad \rightarrow \quad I_2 \ll I$$

La chute de tension dans les fils ne fausse pas la mesure
à condition que les résistances des fils soient les mêmes

Thermocouple

- effet Seebeck

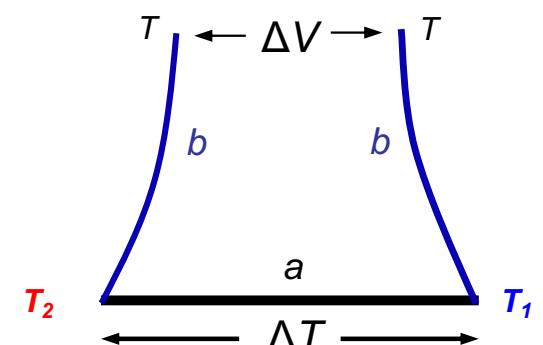
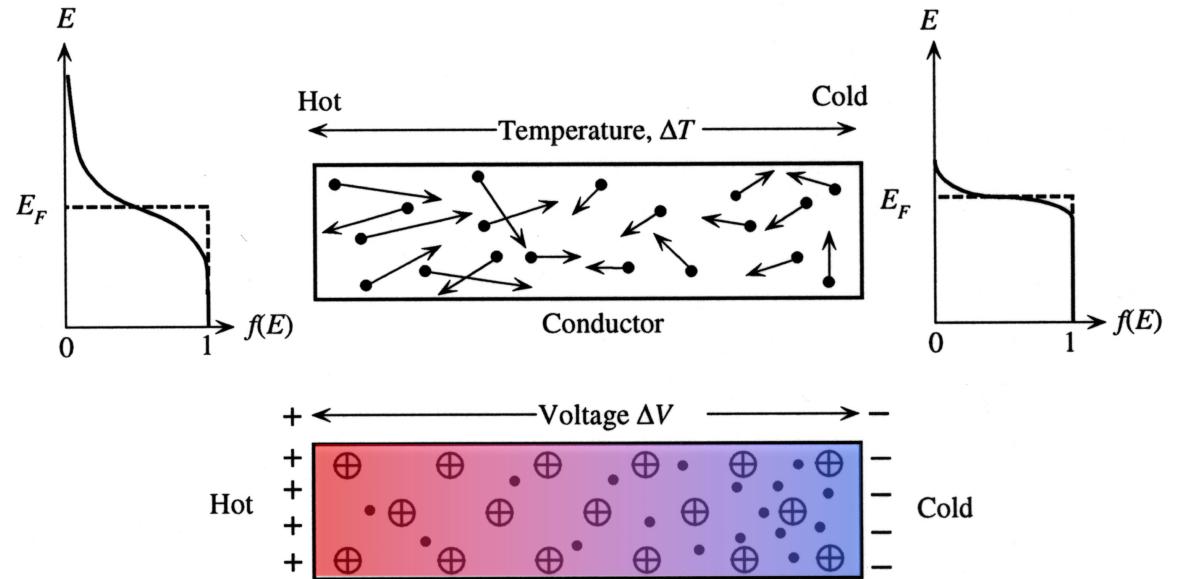
$$\Delta V = S \cdot \Delta T$$

- $S(T)$: coefficient Seebeck
pouvoir thermoélectrique

- deux conducteurs différents (S_a, S_b)
& gradient de température (T_2, T_1)

$$\begin{aligned}\Delta V &= S_b (T - T_2) + S_a (T_2 - T_1) + S_b (T_1 - T) \\ &= (S_a - S_b) (T_2 - T_1)\end{aligned}$$

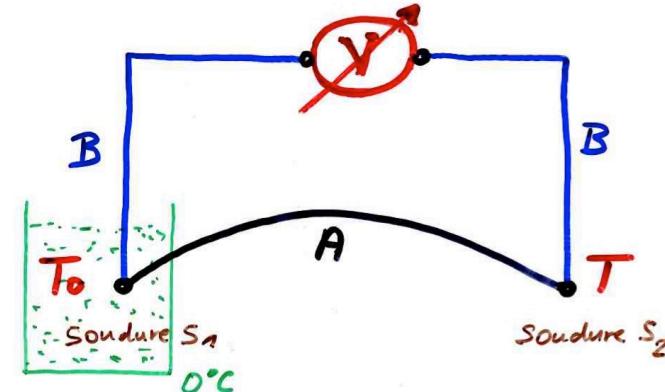
- ΔV ne dépend pas de la géométrie



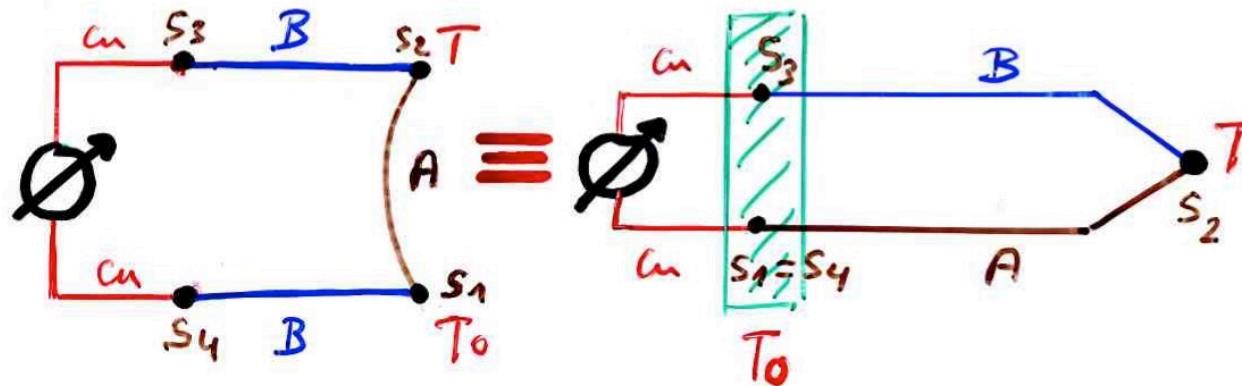
Thermocouple

- soudure froide T_0
référence
(eau – glace, N₂ liquide...)

$$\Delta V = (S_B - S_A)(T - T_0)$$



- montage amélioré
compensation de soudure froide



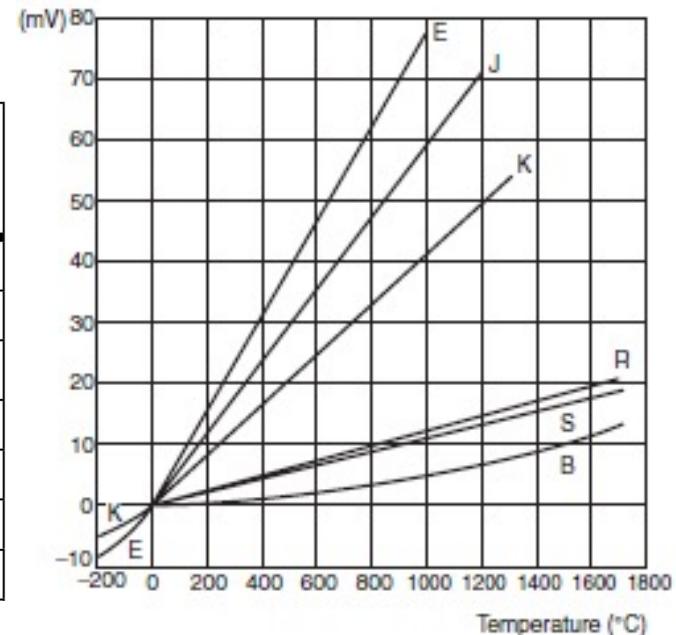
Thermocouple

- gamme des températures:
 - basses T ← faible sensibilité
 - hautes températures ← point de fusion des métaux
- critères de choix:
 - soudure doit résister aux variations de température
 - tension thermoélectrique aussi élevée que possible
 - métaux pas trop chers
- attention:
 - T_0 doit être contrôlé
 - corrosion des métaux et de la soudure par certains gaz (enrober le thermocouple)
 - tensions parasites des connexions

Thermocouple

- exemples:

Type	Materials*	Typical Range °C
T ^{1, 2}	Copper (Cu) vs Constantan	-270 to 400
J ^{1, 3}	Iron (Fe) vs Constantan	-210 to 1200
K	Chromel vs Alumel	-270 to 1370
E	Chromel vs Constantan	-270 to 1000
S	(Pt-10%Rh) vs Pt	-50 to 1768
B	(Pt-13% Rh) vs (Pt-6% Rh)	0 to 1820
R	(Pt-13%Rh) vs Pt	-50 to 1768



MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade
– 328 to 2282°F
– 200 to 1250°C

Extension Grade
32 to 392°F
0 to 200°C

LIMITS OF ERROR

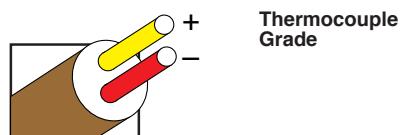
(whichever is greater)
Standard: 2.2°C or 0.75% Above 0°C
2.2°C or 2.0% Below 0°C

Special: 1.1°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:

Clean Oxidizing and Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Wide Temperature Range; Most Popular Calibration

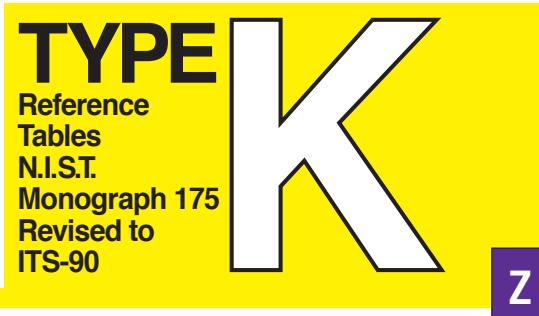
TEMPERATURE IN DEGREES °C
REFERENCE JUNCTION AT 0°C



Nickel-Chromium
vs.
Nickel-Aluminum

Extension
Grade

Revised Thermocouple Reference Tables



V(T) n'est pas linéaire!

Thermique: régulation de température

- but: "maîtriser" la température d'un système physique
 - savoir imposer T
 - maintenir le système à $T \pm \Delta T$ (ΔT le plus petit possible)
- variations de T d'un système physique
 - échanges de chaleur avec l'extérieur
 - $\delta Q > 0$: chaleur reçue par le système
 - $\delta Q < 0$: chaleur cédée par le système
- refroidir
 - = extraire de la chaleur
 - = mettre le système S en contact avec environnement E à T_E plus basse que T_S (cf. cryogénie)

$$\delta Q = C_p dT$$



Fournir de la chaleur au système physique

- four: appareil qui fournit de l'énergie sous forme de chaleur
- fours à combustion:
 - charbon, mazout, gaz
 - utilisés dans l'industrie (métallurgie)
- fours électriques
 - utilisés en laboratoire
 - plus propres, plus faciles à réguler

énergie électrique ➔ énergie thermique

- dépendant du mode de transformation de l'énergie, on distingue plusieurs types de fours électriques

Fours électriques

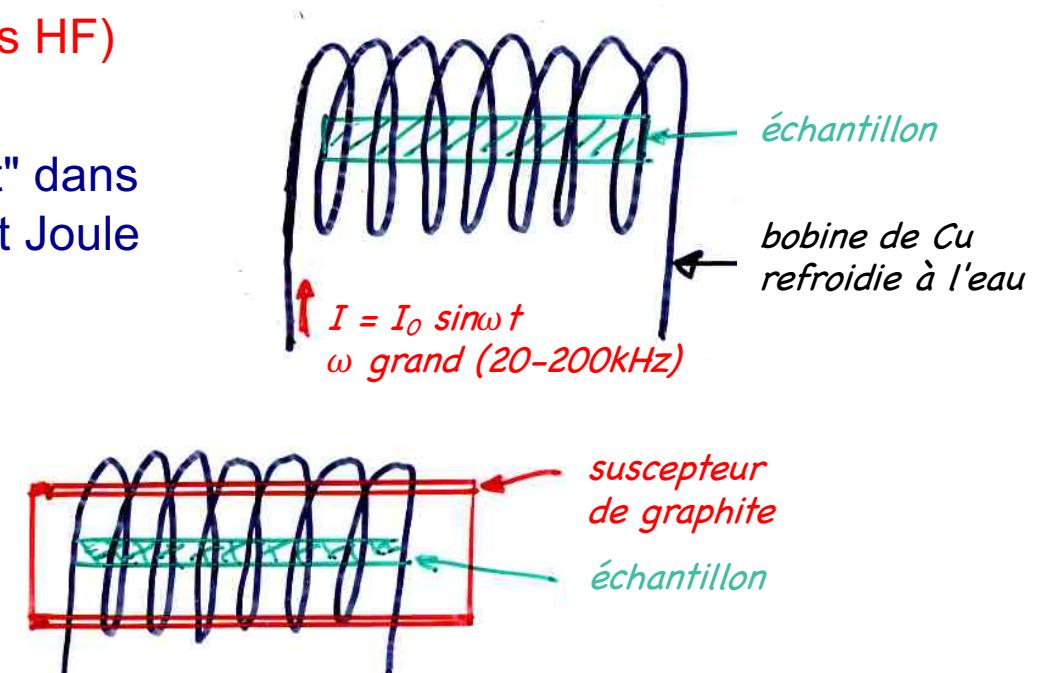
- four à résistance
 - chauffage par effet Joule



$$P = RI^2$$
$$E = RI^2t$$

- four à induction haute fréquence (fours HF)

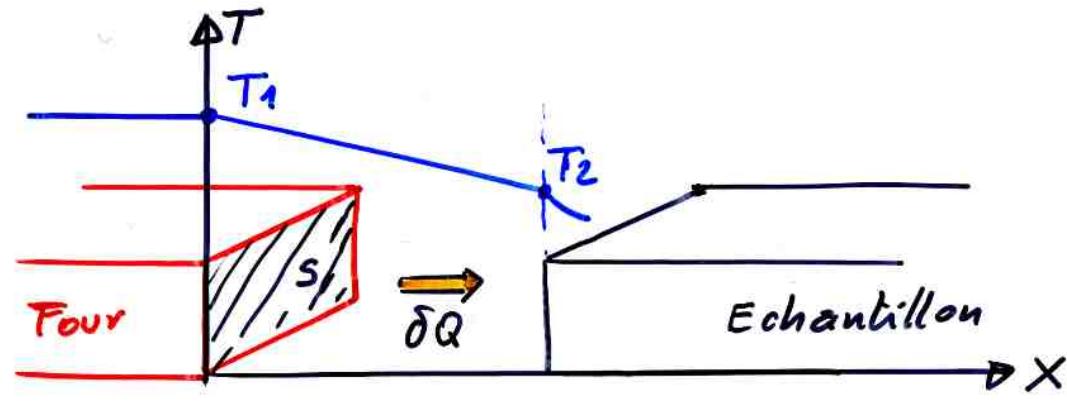
- induction de "courants de Foucault" dans l'échantillon qui s'échauffe par effet Joule
- avantage: faible inertie
- si matériau non conducteur:



Transfert de chaleur



I. conduction



$$\delta Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dt$$

S = surface d'échange

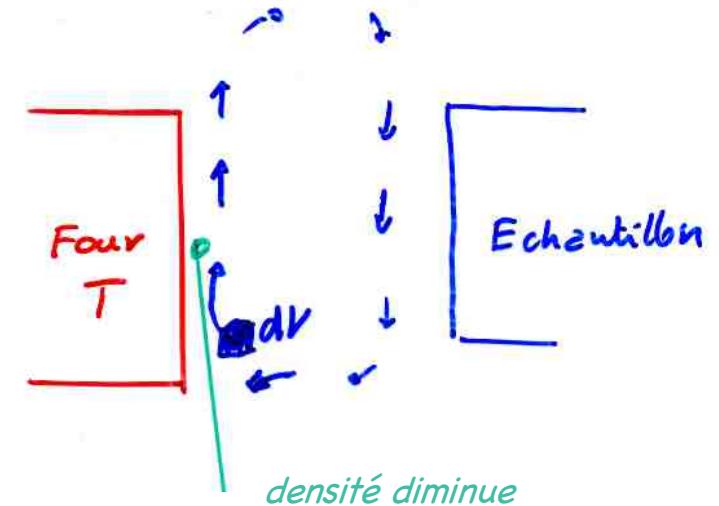
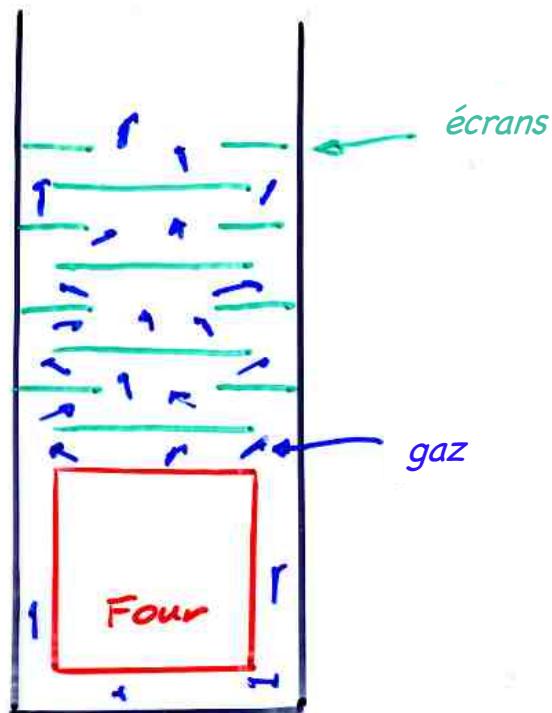
λ = coeff. de conductibilité thermique

élément	λ à 20°C [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
cuivre	401
aluminium	205
acier	16
hélium	0.142
azote	0.024

Transfert de chaleur

II. convection

- transmission de chaleur avec transport de matière
(liquides, gaz)



phénomène indésirable
à minimiser dans l'installation de mesure

→ écrans

Transfert de chaleur

III. rayonnement

- tout corps à température $T \neq 0K$ émet un rayonnement électromagnétique
- meilleur émetteur \rightarrow corps noir
- puissance par unité de surface: $P = \sigma T^4$

loi de Stefan - Boltzman $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

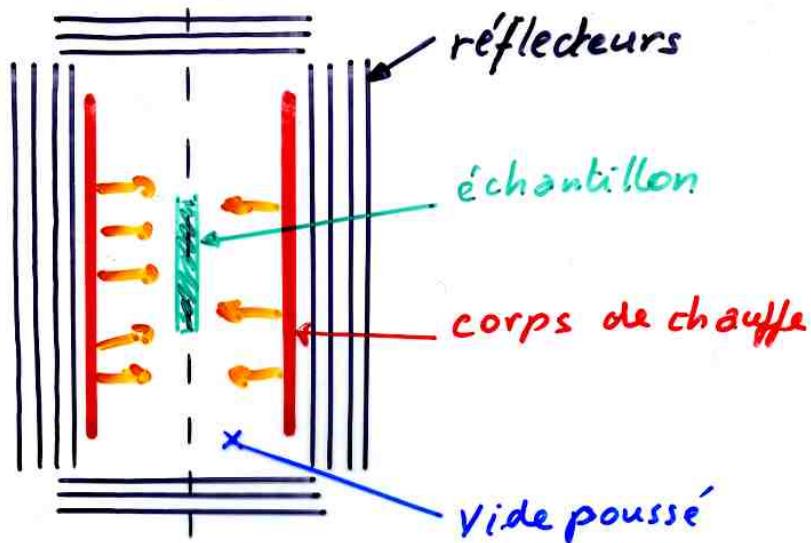
\rightarrow four haute température ($T > 1000\text{K}$)



Fours

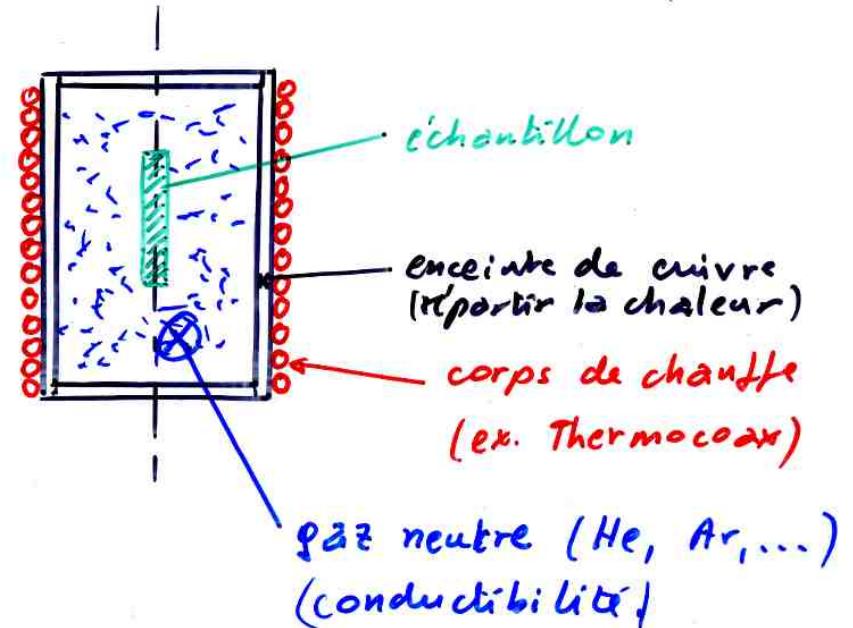
- haute température

$$(T > 1000\text{K}, P = \sigma T^4)$$



- basse température

$$(T < 1000\text{K}, \delta Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dt)$$



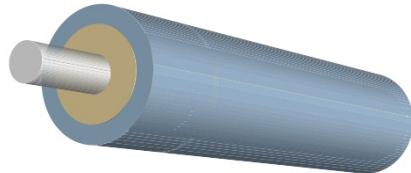
Ame

Pour la partie chaude :

Nickel chrome 80/20 en général, cas particuliers : Balco® ou nickel pur

Pour les parties froides :

Cuivre (nickel dans quelques cas particuliers).



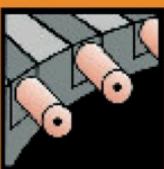
Isolant

Isolant minéral en poudre fortement comprimée.

Gaine

Acier inoxydable austénitique AISI 304L pour des températures inférieures à 600°C.

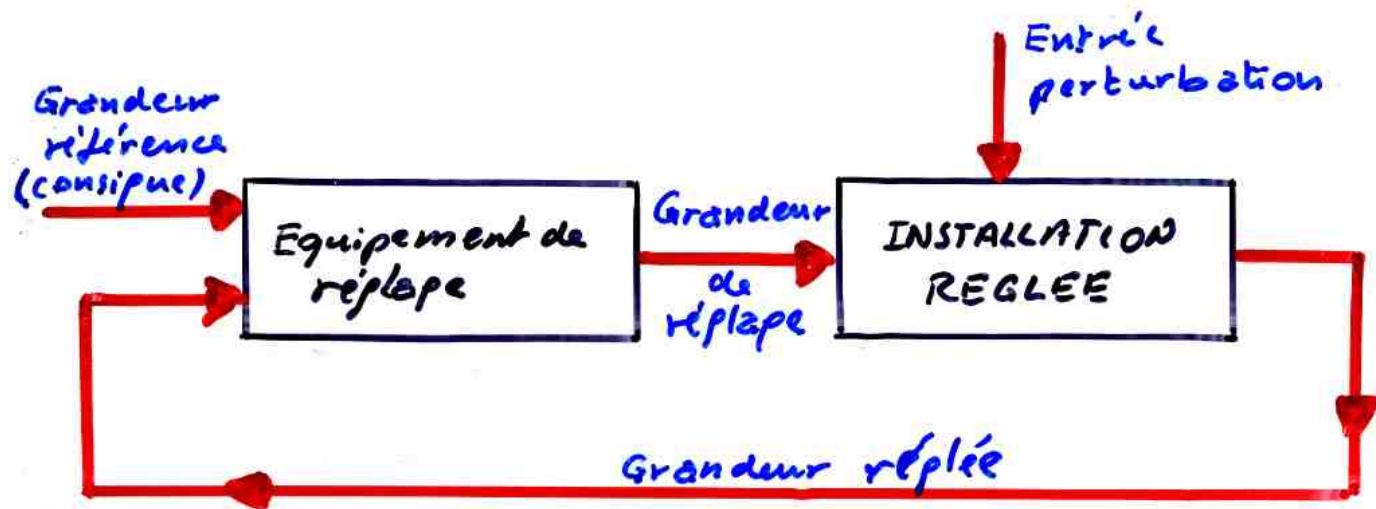
Alliage Inconel® 600 pour des températures supérieures à 600°C.

1 L'élément chauffant est enroulé autour de la pièce.	2 L'élément chauffant est introduit à l'intérieur d'un tube.	3 L'élément chauffant est fixé sur la pièce à l'aide de colliers.
		
4 L'élément chauffant est fixé par des pontets soudés.	5 L'élément chauffant est serré entre 2 plaques métalliques.	6 L'élément chauffant est brasé (ou shoopé) sur le tube.
		
7 L'élément chauffant est introduit dans des gorges et recouvert par un métal ou maté.	8 L'élément chauffant est brasé dans des gorges.	9 L'élément chauffant est noyé dans de l'aluminium ou de l'argent.
		

THERMOCOAX

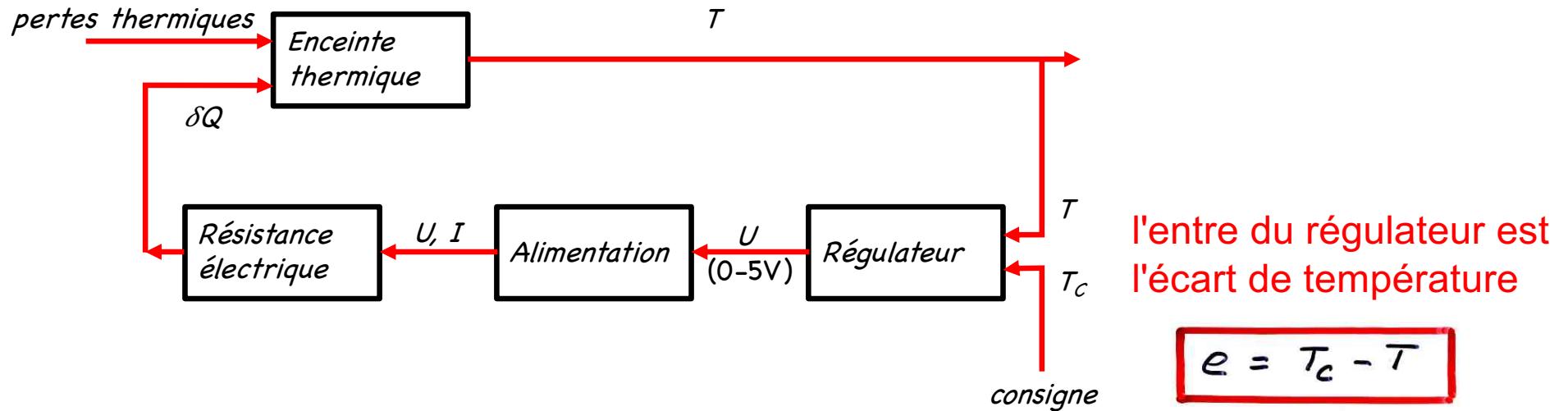
Régulation de température

- le réglage est un ensemble d'opérations qui tendent à donner et à conserver des valeurs prescrites à une certaine grandeur
→ il utilise toujours la mesure de cette grandeur
- circuit de réglage:



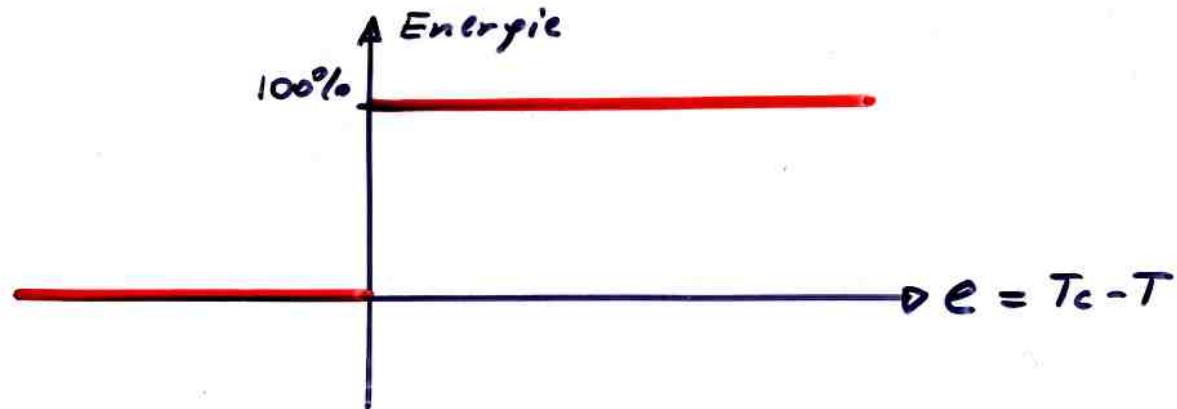
consigne peut être constante ou programmée

Boucle de régulation de température

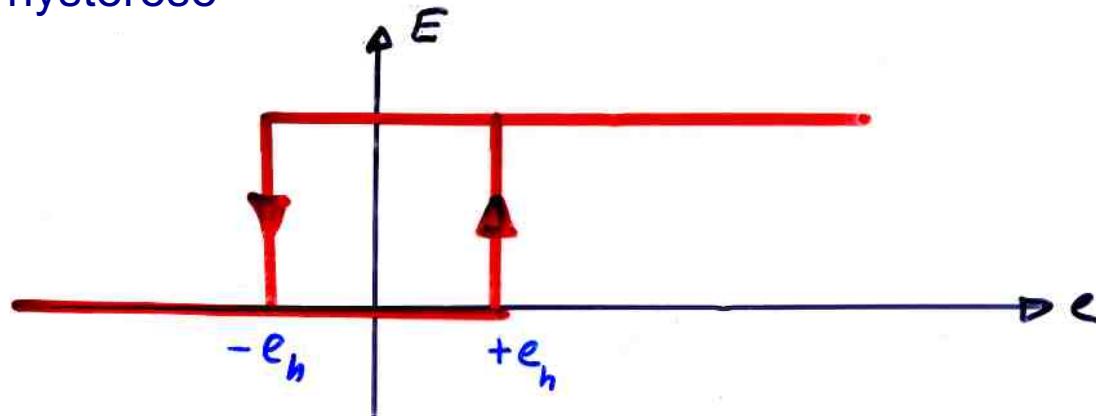


- régulateur pilote l'alimentation (U, I) pour que $T = T_c$
- en fonction de la sortie du régulateur on distingue:
 - régulateur "tout ou rien"
 - régulateur proportionnel P
 - régulateur proportionnel + intégrateur PI
 - régulateur proportionnel + intégrateur + différentiateur PID

Régulation "tout ou rien"

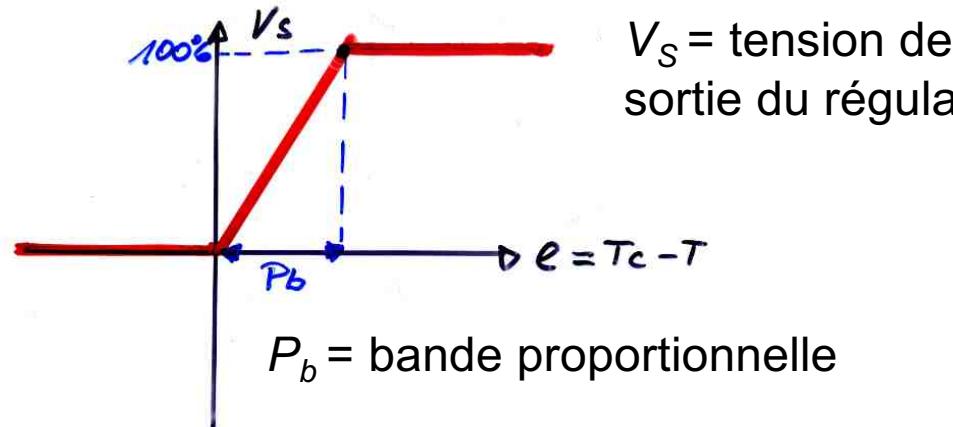


avec hystérèse



- utilisé dans les fours à forte inertie

Régulation proportionnelle P



V_s = tension de sortie du régulateur

P_b = bande proportionnelle

$$V_s = K \cdot e$$

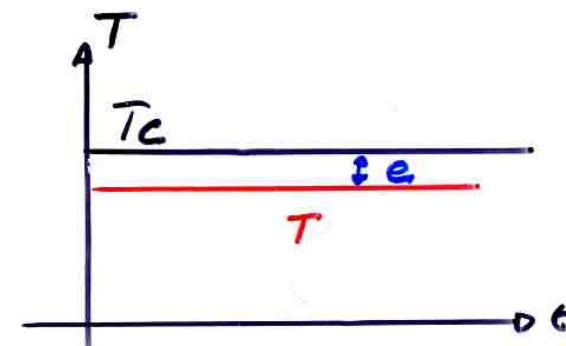
K = gain proportionnel

$$K = \frac{V_s(100\%)}{P_b}$$

- du aux pertes thermiques, il faut appliquer V_s en permanence
→ accepter une erreur statique sur T

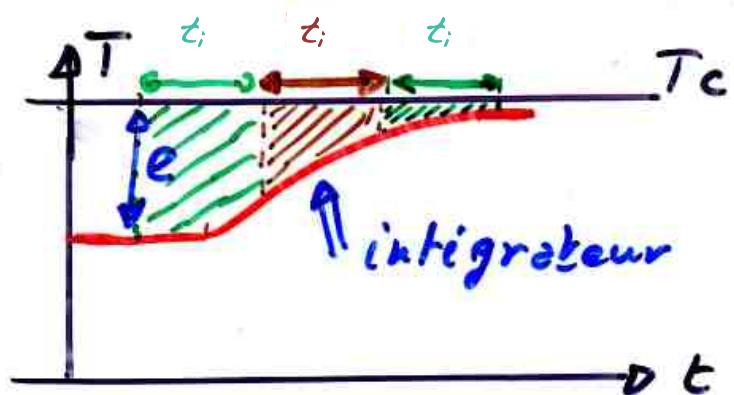
$$e = \frac{V_s}{K}$$

- e petite si K grand
si $K > K_c$, la régulation devient instable



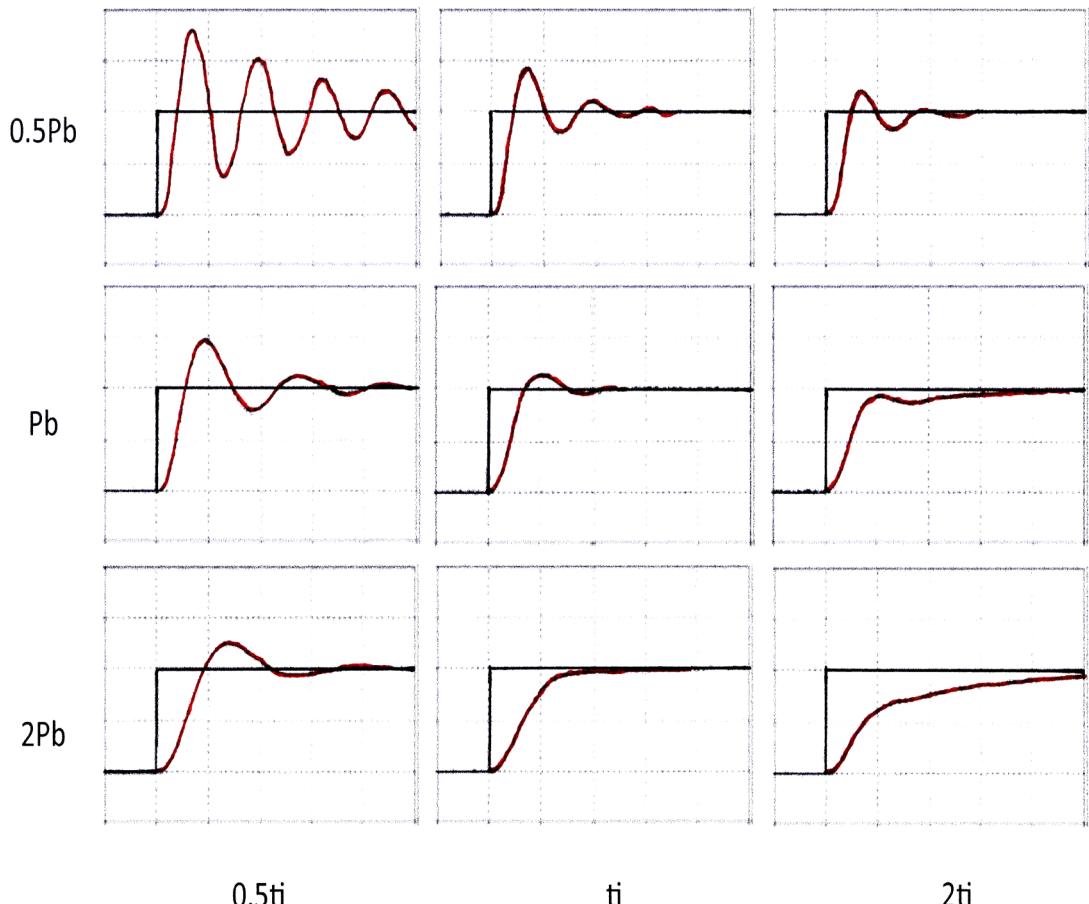
Régulation PI

- action intégrale, réglage PI



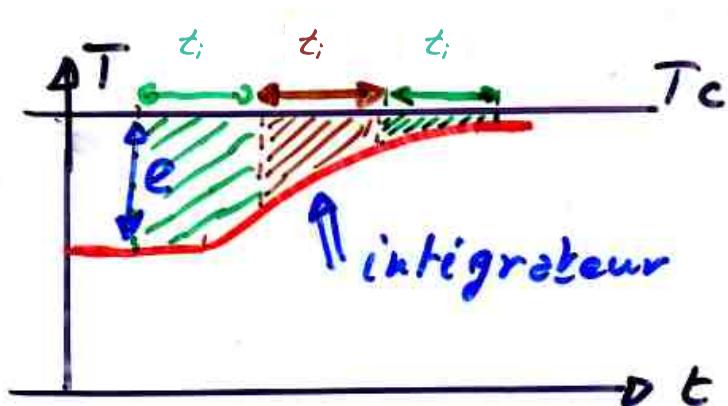
$$V_s = K(e + \frac{1}{t_i} \int e dt)$$

→ action intégrale annule le statisme
en ramenant T vers T_c lentement



Régulation PID

- action intégrale, réglage PI



→ action intégrale annule le statisme en ramenant T vers T_c lentement

$$V_s = K(e + \frac{1}{t_i} \int e dt)$$

- action dérivée, réglage PID

→ dérivée accélère le retour à équilibre

$$V_s = K \left(e + \frac{1}{t_i} \int e dt + t_d \frac{de}{dt} \right)$$

K = gain proportionnel $\propto \frac{1}{P_b}$

t_i = temps d'intégration

t_d = temps de dérivation