

Capteurs et instrumentation

Ecole de mécanique de l'IN2P3
Le refroidissement des expériences



Matthieu Pierens (mathieu.pierens@ijclab.in2p3.fr)
Ingénieur de recherche
Pôle Accélérateurs – Service Cryogénie

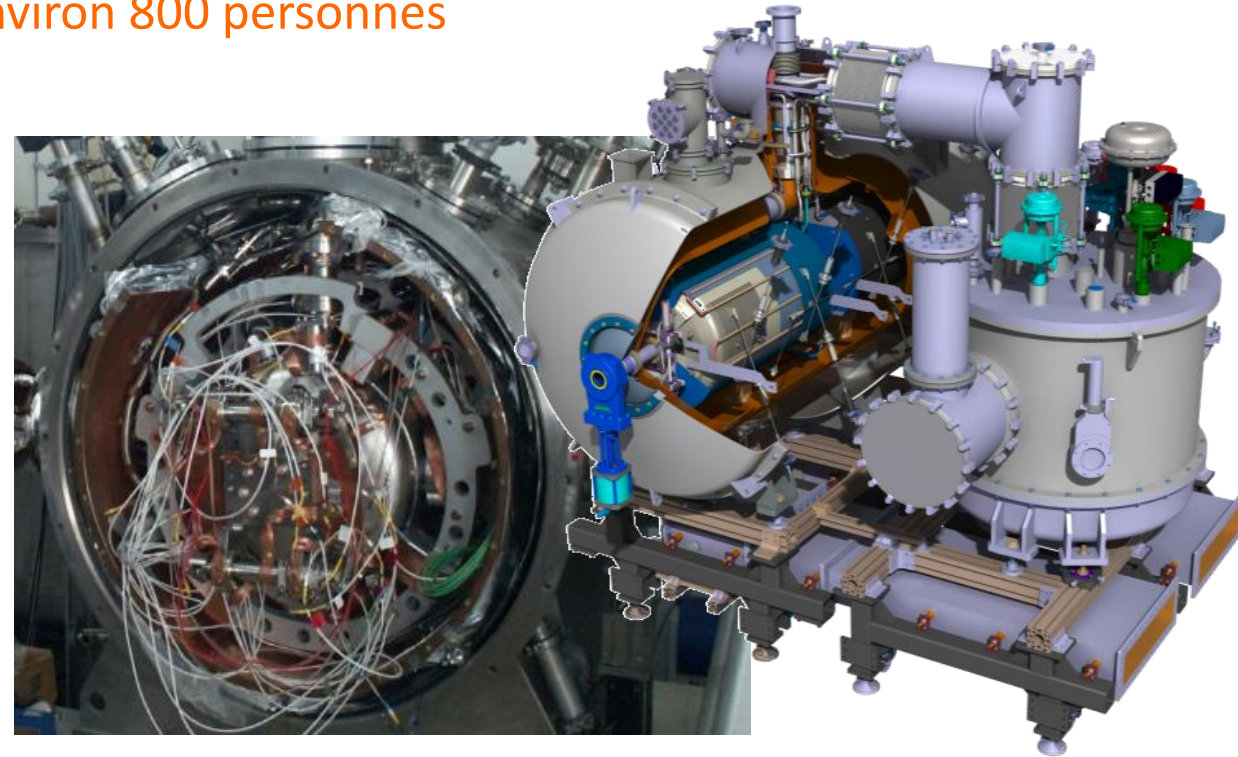
IJCLab • Laboratoire issu de la fusion de cinq laboratoires (CSNSM, IMNC, IPNO, LAL et LPT) situés sur le campus d'Orsay (vallée)

Activités :

développement d'expérimentations

- Caractérisation de lignes de transfert de LNG
- Thermoacoustique : $T \in [T_{amb}-700^{\circ}\text{C}]$
 - ➔ Champs de températures
 - ➔ Refroidissement (eau) : débit, température, bilan de puissance
 - ➔ Pression statique et dynamique (acoustique)
- Cryomodules (ESS, MYRRHA) : $T \in [2\text{K}-T_{amb}]$
 - ➔ Champs de températures
 - ➔ Refroidissement (débit, température, vannes)
 - ➔ Pression statique et vide
 - ➔ Niveau d'hélium liquide
- Cible cryogénique gazeuse d'He3 : $T \in [4\text{K}-T_{amb}]$

• Effectif : environ 800 personnes



Equipements

- **Infrastructures cryogéniques**

- ➔ Liquéfacteur d'hélium LINDE L70

- ➔ Système de récupération et de stockage GHe

- ➔ Un site de test de cavités supraconductrices en cryostat vertical et cryostats de R&D

- ➔ Un site de test de cryomodules (40W@2K et 80W@2K)

- **Station d'étalonnage de thermomètres cryogéniques**

- **Banc de mesure de RRR**

- **Banc de mesure de conductivité thermique**





Plan de la présentation

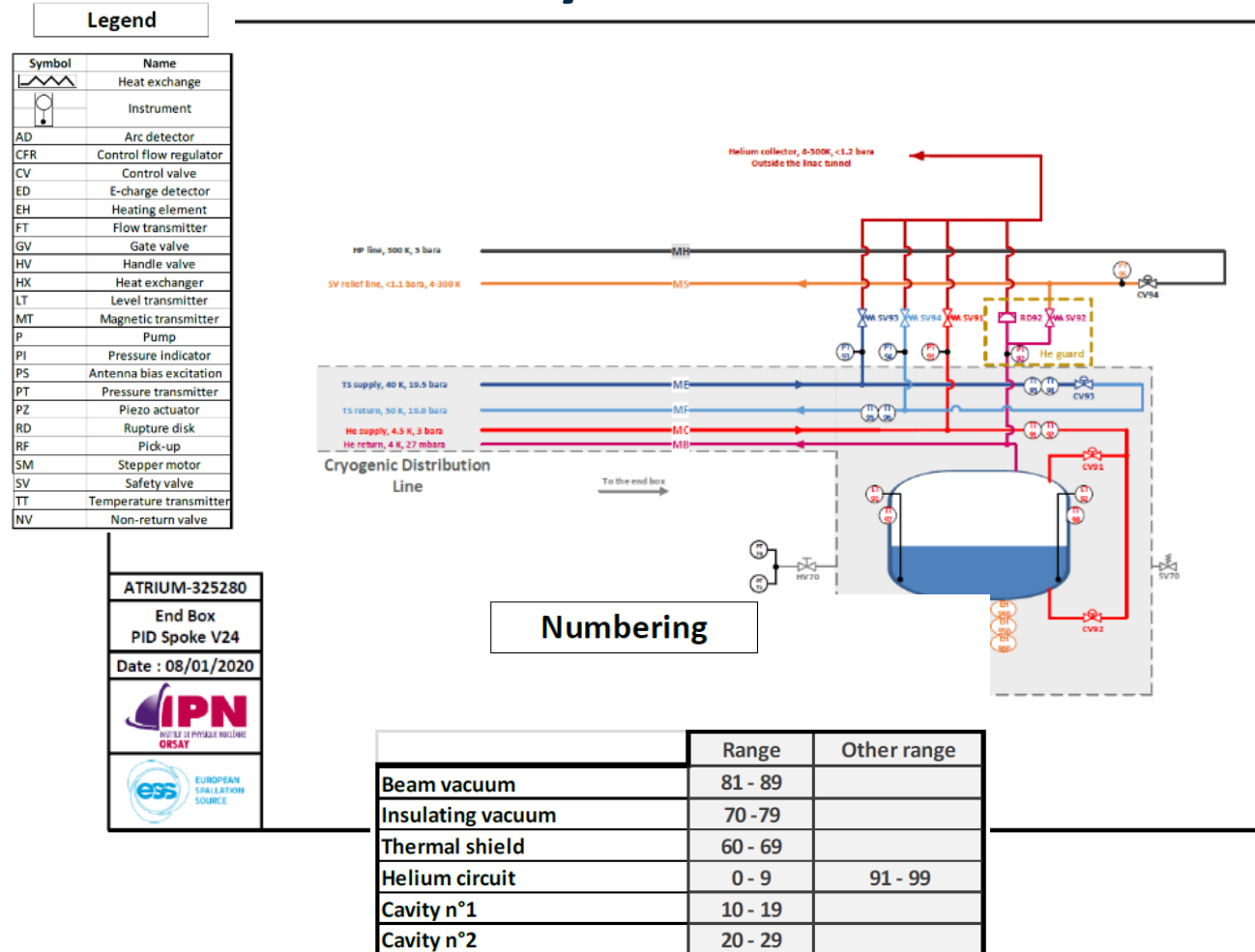
- I. Introduction
- II. Documenter l'instrumentation
- III. Rappels sur les capteurs
- IV. Thermométrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
 - Mise en œuvre
 - Acquisition
- V. Débitmétrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VI. Mesure de pression
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VII. Bilan de puissance
- VIII. Conclusion



Vue d'ensemble de l'instrumentation d'un système

• Schéma de tuyautage et d'instrumentation (P&ID)

- ➔ Représentation des circuits, capteurs et actionneurs
- ➔ Accompagné d'une légende et d'une numérotation
- ➔ Suivi de modifications des versions





Détails des composants et de leur câblage

- **Liste d'instrumentation**

- ➔ Détaille pour chaque composant ses caractéristiques (référence, localisation, étendue de mesure, alimentation, signal de sortie, raccordement)

- **Câblage interne**

- ➔ Informations sur le câblage des composants jusqu'aux embases hermétiques (voir au-delà).

- **Câbles d'instrumentation et connecteurs**

- ➔ Description des différents câbles (référence du câble, section ou AWG des conducteurs, longueur, terminaison aux extrémités, raccordement des connecteurs) reliant les embases hermétiques et l'instrumentation externe aux baies de C&C



Vue d'ensemble des chaînes d'acquisition et de commande

- **Schéma synoptique**

- ➔ Détaille pour chaque type de capteur ou d'actionneur l'architecture du système de C&C
- ➔ Indique les liaisons entre les capteurs, les conditionneurs et le matériel d'acquisition et la nature des signaux (analogiques ou TOR, bus de communication)

- **Remarque : le routage des câbles, l'intégration des capteurs ou actionneurs et leur(s) interface(s) mécanique(s) ainsi que les thermalisations doivent être pris en compte au plus tôt dans la conception... et si possible intégrés aux modèles 3D (CAO)**



Plan de la présentation

- I. Introduction
- II. Documenter l'instrumentation
- III. Rappels sur les capteurs
- IV. Thermométrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
 - Mise en œuvre
 - Acquisition
- V. Débitmétrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VI. Mesure de pression
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VII. Bilan de puissance
- VIII. Conclusion



- **Les capteurs actifs :**

- ➔ Ils assurent une conversion d'énergie en énergie électrique

- ➔ Au mesurande est associé une tension

Exemple : le thermocouple

Un capteur actif n'a pas besoin d'alimentation électrique.

- **Les capteurs passifs**

- ➔ Leur impédance varie en fonction du mesurande.

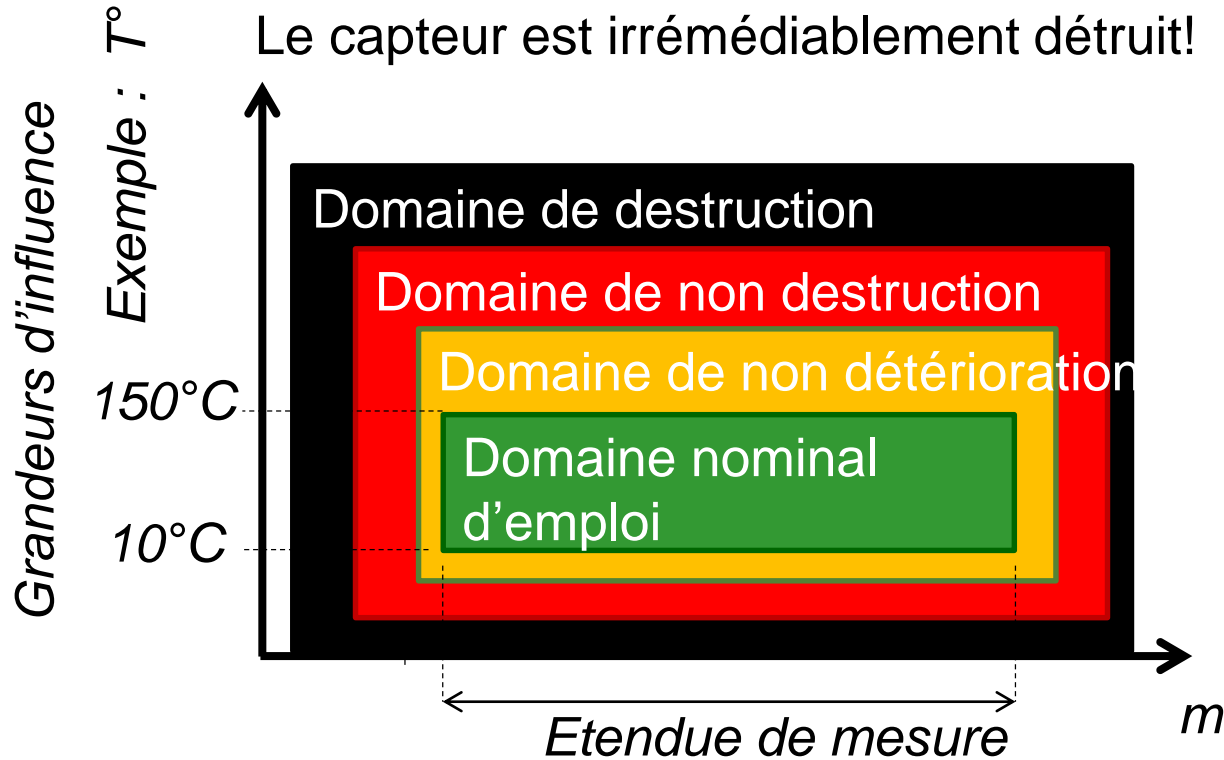
- ➔ Dans de nombreux cas, résistivité d'un matériau qui varie avec le mesurande.

Exemple : la thermistance

Un capteur passif doit être alimenté pour fournir une information exploitable.



- Domaines d'utilisation d'un capteur



Irréversibilité des modifications.
Ré-étalonnage complet du capteur.

Le capteur continue à fonctionner de manière satisfaisante avec des caractéristiques modifiées.

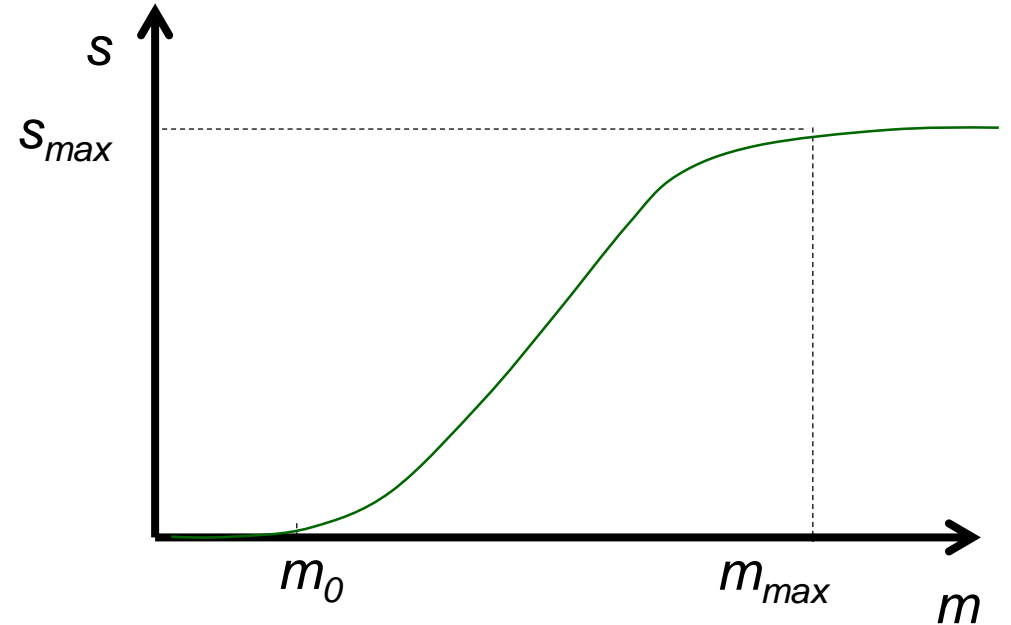
Les caractéristiques spécifiées par le constructeur sont valables.



• Courbe de réponse statique d'un capteur

- m_0 valeur minimale du mesurande nécessaire pour obtenir une grandeur de sortie non nulle
- pour $m > m_{max}$ la grandeur de sortie ne peut dépasser une valeur maximale : *saturation*
- mesurandes compris entre m_0 et m_{max}

Etendue de mesure : c'est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles l'erreur du capteur est supposée comprise entre des limites spécifiées.





Rappel sur les capteurs

- **Sensibilité (capteur de température) :**

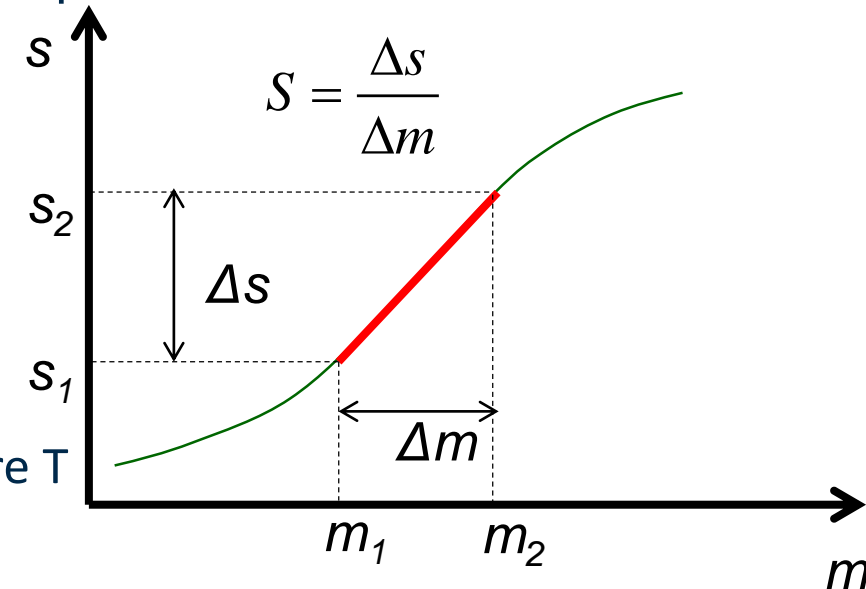
C'est la variation du signal de sortie du capteur générée par la variation du mesurande (température, pression, débit, etc.)

- $S = \frac{dV}{dT}$ pour un capteur qui délivre une tension
- $S = \frac{dR}{dT}$ pour un capteur ohmique

- **Sensibilité adimensionnelle :**

C'est la sensibilité relative du thermomètre à la température T

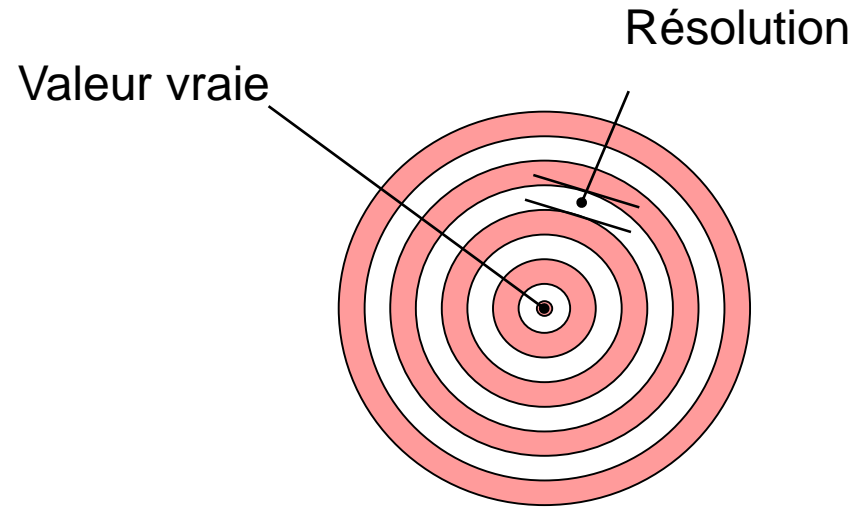
- $\left(\frac{T}{V}\right)\left(\frac{dV}{dT}\right)$ pour un capteur qui délivre une tension
- $\left(\frac{T}{R}\right)\left(\frac{dR}{dT}\right)$ pour un capteur ohmique





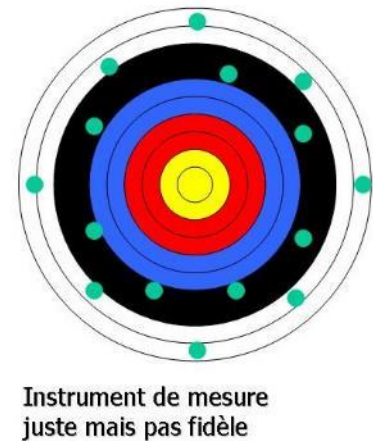
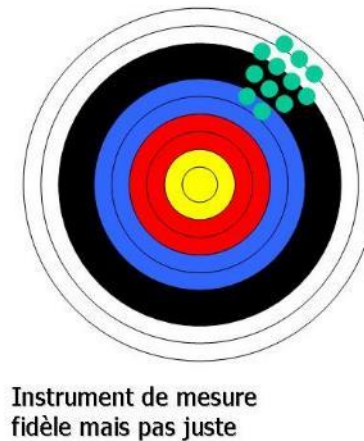
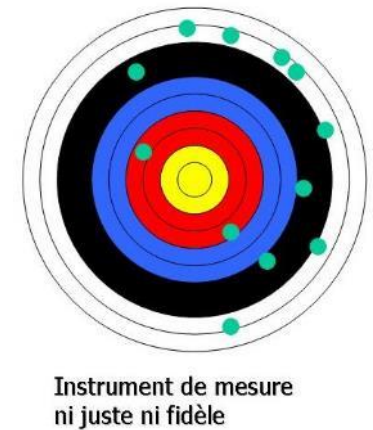
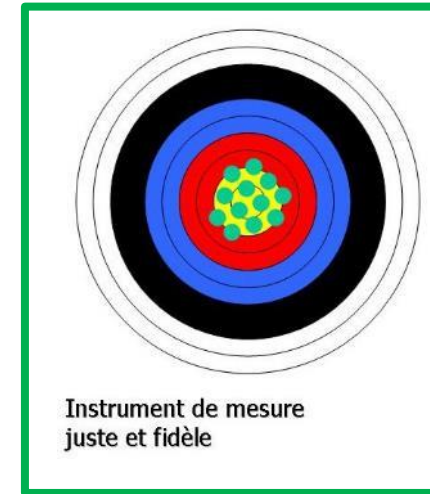
Rappel sur les capteurs

- Justesse, fidélité, exactitude et résolution



Résolution

C'est la plus petite variation de mesurande qui produit une variation perceptible de l'information délivrée par le capteur.





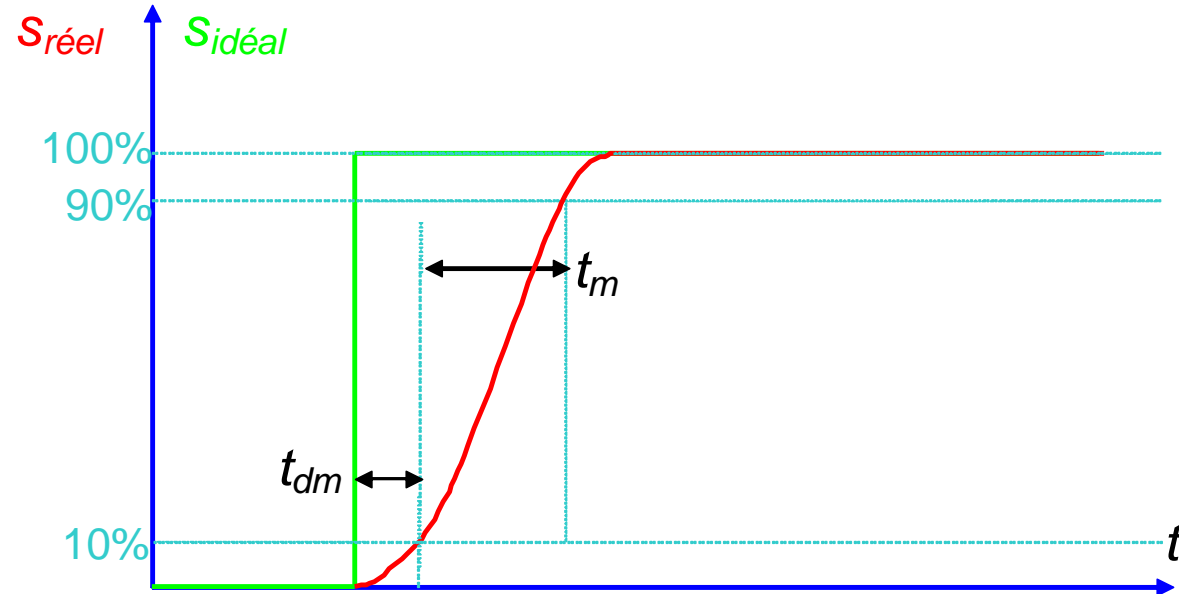
• Courbe de réponse dynamique d'un capteur

- Temps de retard à la montée
Temps pour que la grandeur de sortie s croisse de sa valeur initiale de 10% de sa variation totale.

- Temps de montée
Intervalle de temps correspondant à la croissance de s de 10% à 90% de sa variation totale

- Temps de réponse

$$t_r(10\%) = t_{dm} + t_m$$



t_{dm} : délai à la montée (10% de s_{final})
 t_m : temps de montée (entre 90% et 100% de s_{final})



- Critères de choix d'un capteur

Le choix d'un capteur va dépendre de (exemple pour un thermomètre) :

- la température et l'étendue de la température
- l'exactitude et la résolution souhaitées \Rightarrow capteur industriel ou de métrologie
- l'interchangeabilité
- la sensibilité $dR/dT \Rightarrow$ de préférence la sensibilité adimensionnelle
- le temps de réponse (fonction de)
 - Technologie
 - Masse/volume du capteur et type de conditionnement
 - Équilibre thermique (dépend des transferts thermiques)
- environnement \Rightarrow industriel, champ magnétique, rayonnements ionisants...
- budget prévu (penser au coût de l'étalonnage et au coût de la chaîne de mesure ou au coût de la voie de mesure)
- vieillissement (évolution des caractéristiques et notamment la stabilité)
- robustesse (résistance aux chocs...)



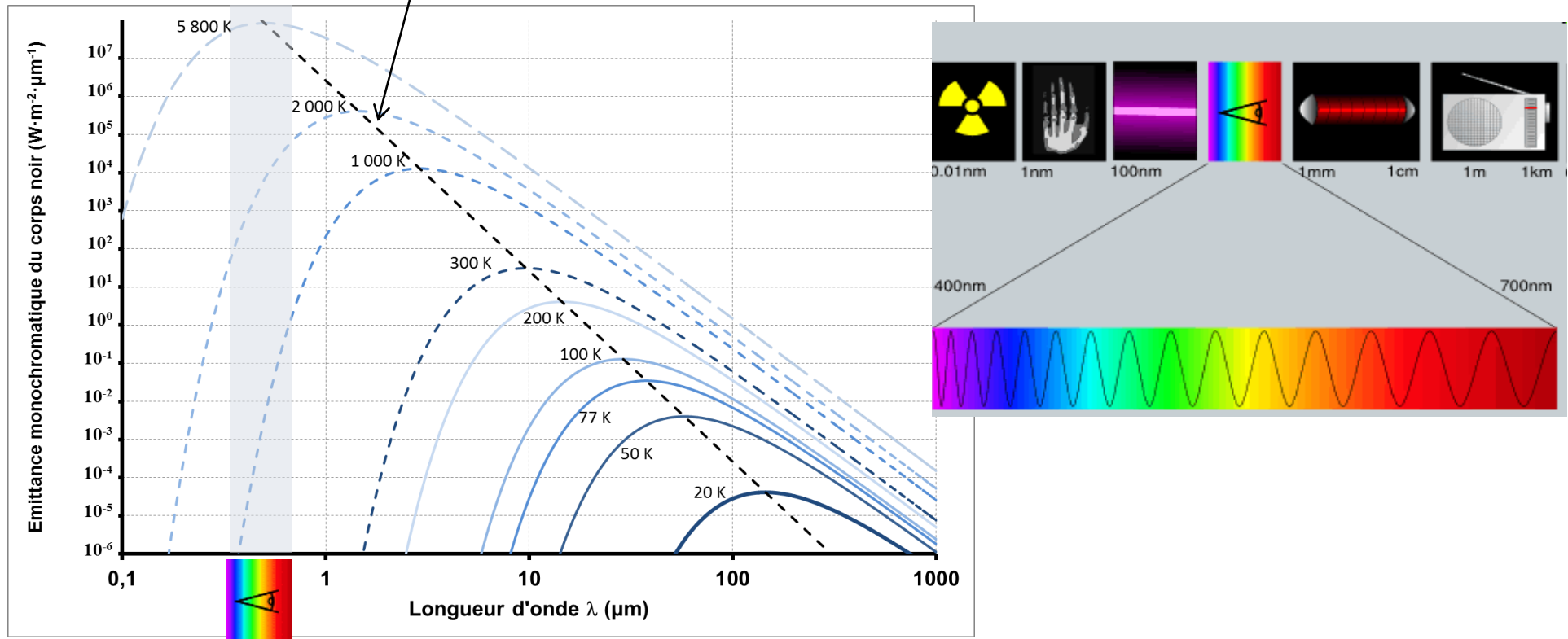
- I. Introduction
- II. Documenter l'instrumentation
- III. Rappels sur les capteurs
- IV. Thermométrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
 - Mise en œuvre
 - Acquisition
- V. Débitmétrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VI. Mesure de pression
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VII. Bilan de puissance
- VIII. Conclusion



Principe de mesure 1/2

- ➔ Un corps de température T a une émittance totale qui dépend de sa température $M = \epsilon\sigma T^4$
- ➔ La proportion de chaque longueur d'onde dépend de la température T du corps qui émet

Loi de Wien : $\lambda_{\max} \cdot T = \text{cste} = 2898 \mu \cdot \text{K}$



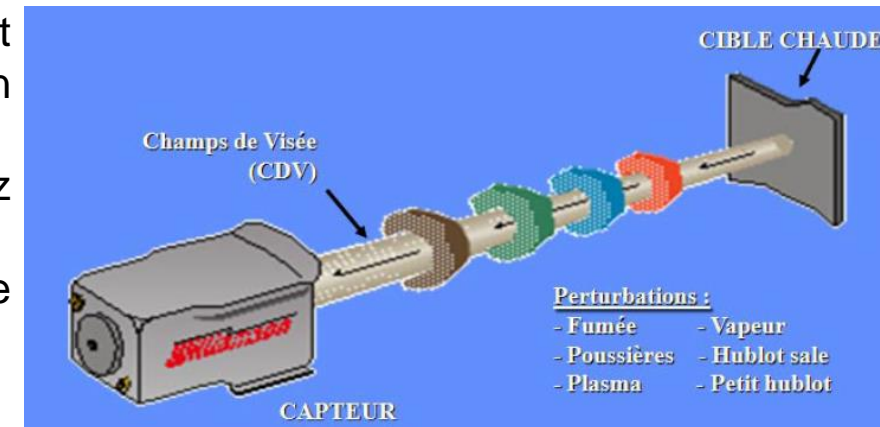


Principe de mesure 2/2

- Un pyromètre mesure l'énergie correspondant aux radiations émises par un objet (généralement dans le domaine de l'infrarouge). Cette énergie est convertie en une valeur de température. Un pyromètre est donc un appareil qui permet de mesurer la température de l'objet sans contact direct avec celui-ci.
- Le pyromètre est composé d'une lentille qui focalise l'énergie des radiations infrarouges émises par l'objet sur un étalon chauffé ou sur un détecteur qui convertit cette énergie en un signal électrique lui-même converti en température.

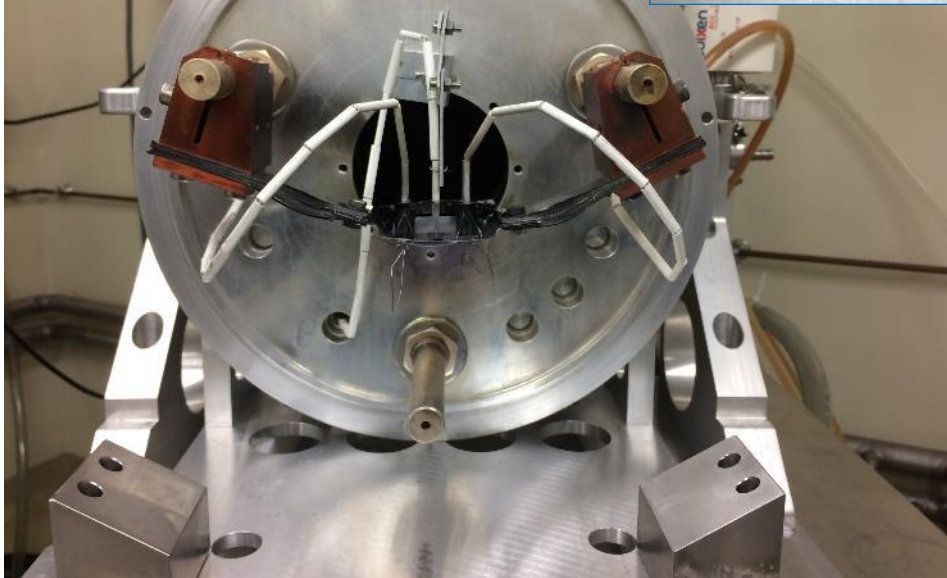
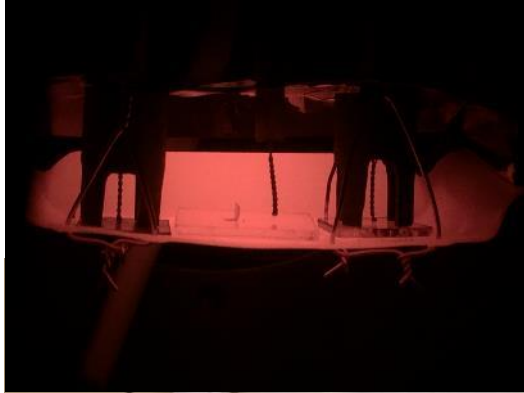
Perturbations :

- absorption (et réflexion) du rayonnement émis par les particules en suspension dans l'air (fumée, poussière, brouillard)
- absorption du rayonnement par les gaz présents dans l'air ;
- absorption due à l'encrassement de l'optique ;
- ...





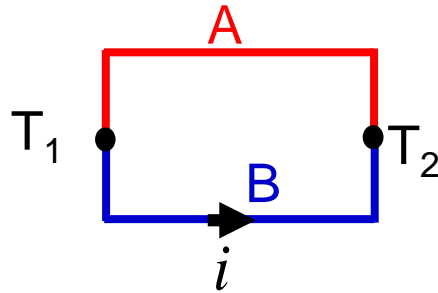
Exemple





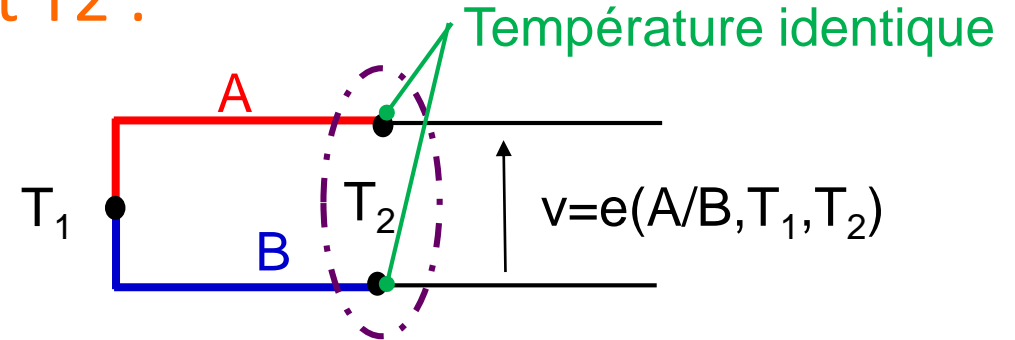
Principe de mesure

Effet Seebeck : 2 métaux différents A et B dont les soudures sont à des températures différentes T_1 et T_2 :



Circuit fermé :

⇒ circulation d'un courant



Circuit ouvert :

⇒ apparition d'une F.E.M.

- Comme la F.E.M. dépend de la différence de température entre les 2 jonctions, il faut s'assurer de connaître la température de l'une d'entre elle pour déduire la température de l'autre.
- La jonction dont la température est connue est dite "**jonction de référence**".
- Avec une jonction à 0 °C, les F.E.M. mesurées varient de -10 à +60 mV environ.



Caractéristiques de quelques thermocouples

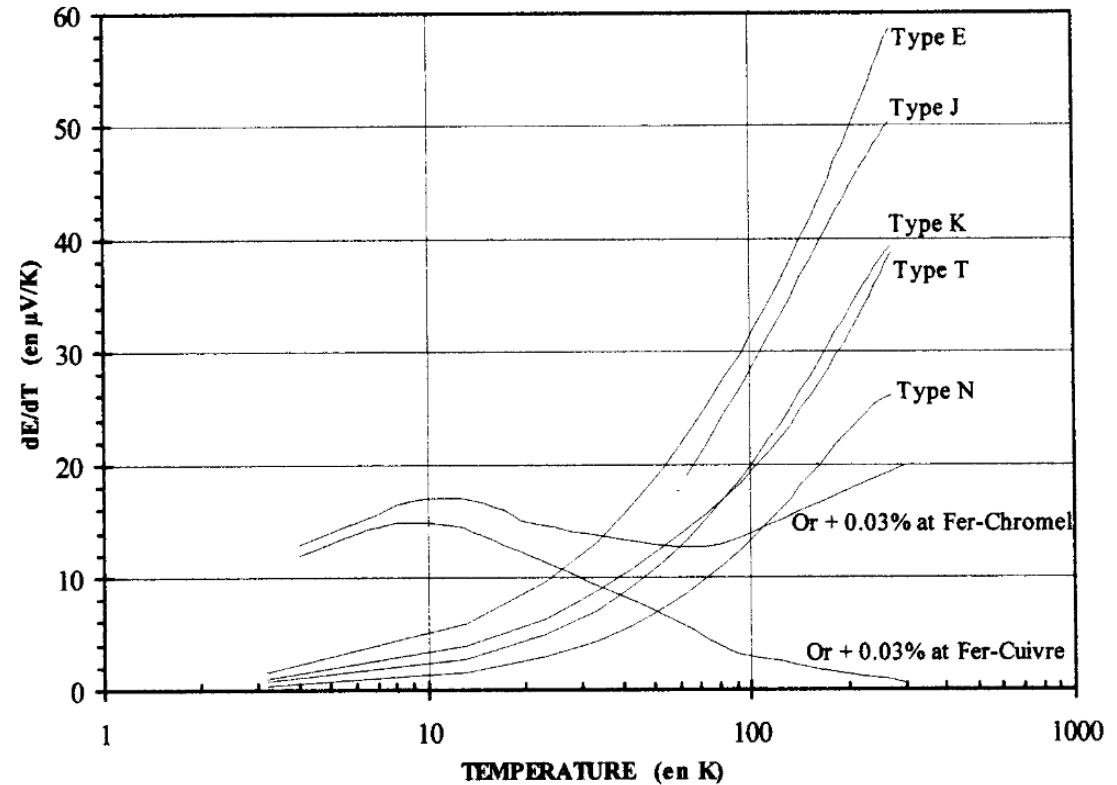
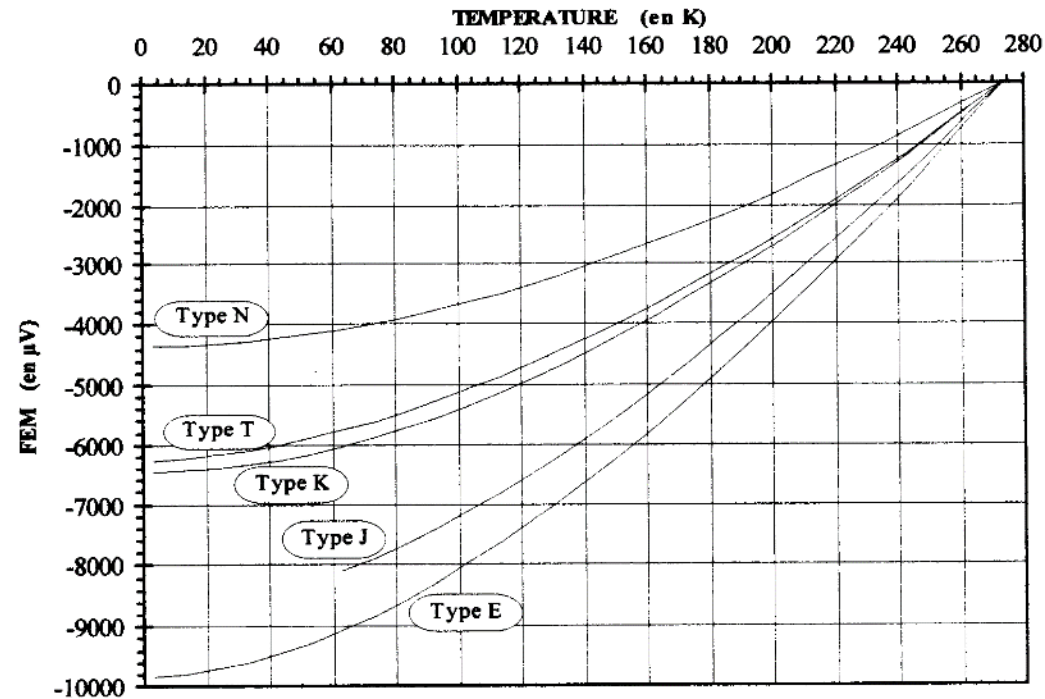
Constantan : nickel - cuivre
Chromel : nickel - chrome
Alumel : nickel - aluminium

Couple	Plage de température (°C)	Sensibilité moyenne ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Remarques
Cuivre - constantan (type T)	- 270 à + 400	3 à 62	peut être utilisé en atmosphère oxydante ou réductrice
Chromel constantan (type E)	- 270 à + 1000	4 à 75	peut être utilisé en atmosphère oxydante ou réductrice
Fer – constantan (type J)	- 210 à + 760	20 à 64	oxydation du Fer au-dessus de 350 °C
Chromel - alumel (type K)	- 270 à +1100	2 à 38	presque linéaire au dessus de 0 °C, à éviter en atmosphère réductrice

Le thermocouple est le capteur par contact permettant les mesures de températures les plus élevées (jusqu'à 2300°C).



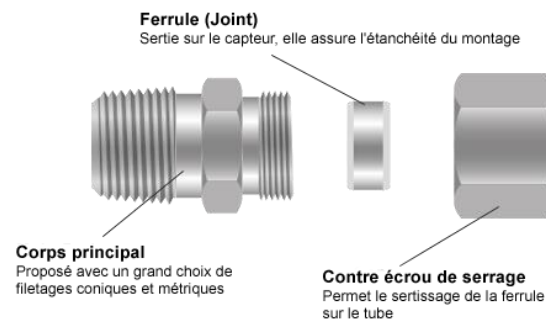
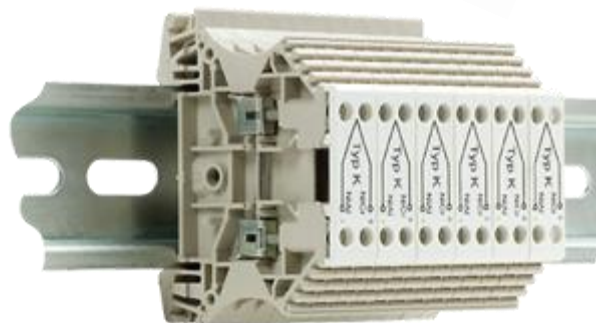
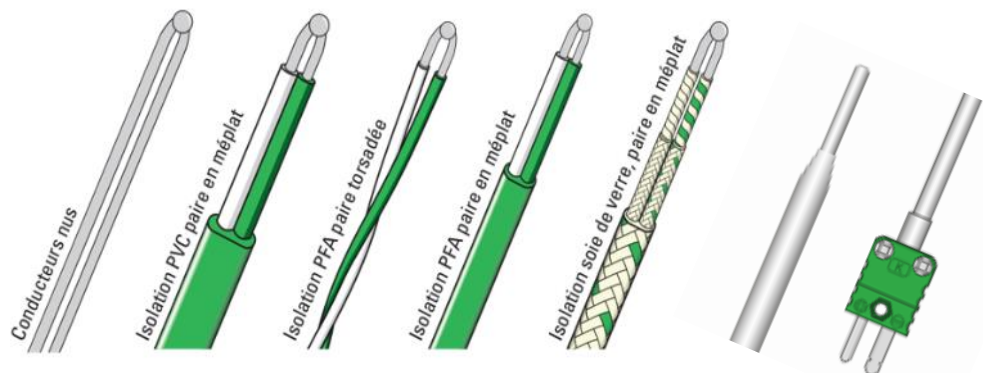
Caractéristiques de quelques thermocouples



Température de référence : 0°C



Exemples de conditionnement et d'accessoires

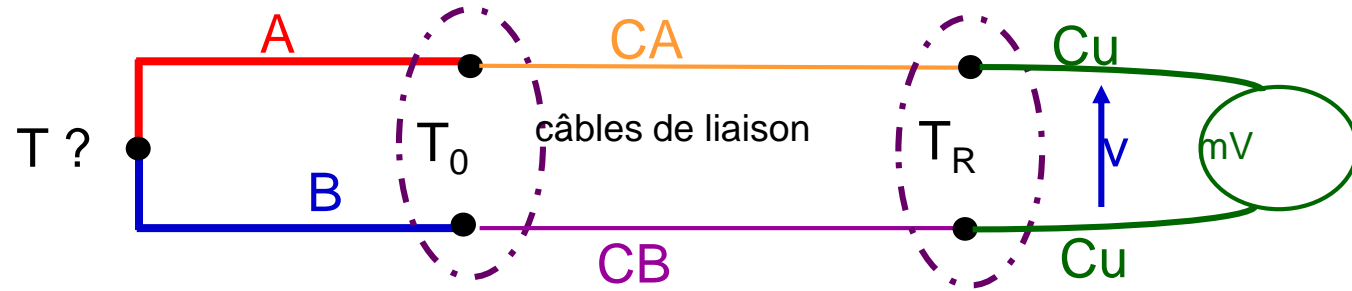


➔ Fournisseurs potentiels : TC Direct, OMEGA, Thermocoax, WIKA



Thermométrie par contact – Thermocouples

Mise en œuvre



$$v = e(A/B, T, T_0) + e(B/CB, T_0, T_R) + e(CA/A, T_0, T_R)$$

Montage direct : $CA \equiv CB \equiv Cu$

$\Rightarrow v = e(A/B, T, T_0)$

\Rightarrow nécessité de connaître la température aux jonctions entre les conducteurs du thermocouple (A et B) et les fils de mesure (CA et CB) $\Rightarrow T_0 = T_{REF}$

Montage compensé : $CA \equiv A$ et $CB \equiv B \Rightarrow e(CA/A, T_0, T_R) = e(B/CB, T_0, T_R) = 0$

$\Rightarrow v = e(A/B, T, T_R)$

\Rightarrow nécessité de connaître la température aux jonctions entre les fils de compensation (CA et CB) et les câbles de mesure : $\Rightarrow T_R = T_{REF}$ (généralement plus commode : cf. carte d'acquisition avec mesure intégrée des connexions de mesure).



Synthèse

- Plage de température : 4 K - 2600 K
- Bonne sensibilité pour $T > 100$ K
- Fonctions standards : pas d'étalonnage, interchangeables
- Exactitude : quelques % Type K : classe 1 +/- 1,5°C; classe 2 +/-2,5°C de -40 à +375°
- Solution peu onéreuse Type T : +/- 0,5°C et +/- 1°C de -40°C à 125°C
- Temps de réponse faible
- Mais : nécessité de la continuité des conducteurs
nécessité d'une température de référence
- La plupart des multimètres mesurent la température des jonctions (bornier), effectuent la correction pour une température de référence de 0°C, et convertissent la tension en température (compensation de soudure froide)



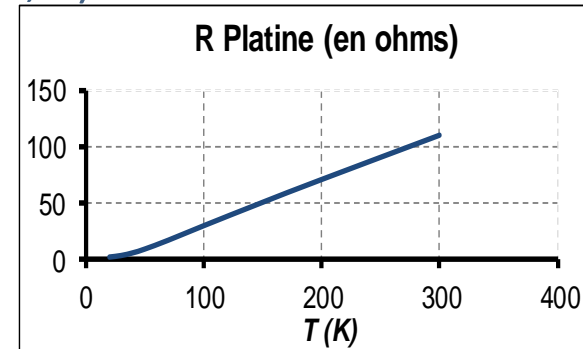
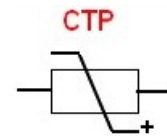
Généralités

- Il existe deux familles de thermomètres résistifs (=passifs)

- Les thermomètres à résistance métallique
 - constitués de matériaux métalliques (platine, nickel, rhodium fer,...)

➤ La résistivité augmente lorsque la température croît

Coefficient de Température Positif

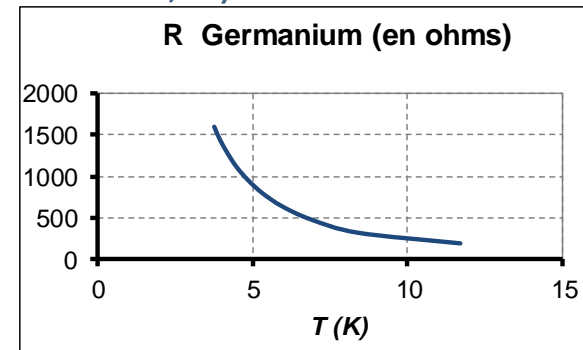
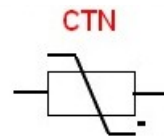


- Les thermistances

- constitués d'oxydes métalliques semiconducteurs (silicium, germanium,...)

➤ La résistivité diminue lorsque la température croît

Coefficient de Température Négatif



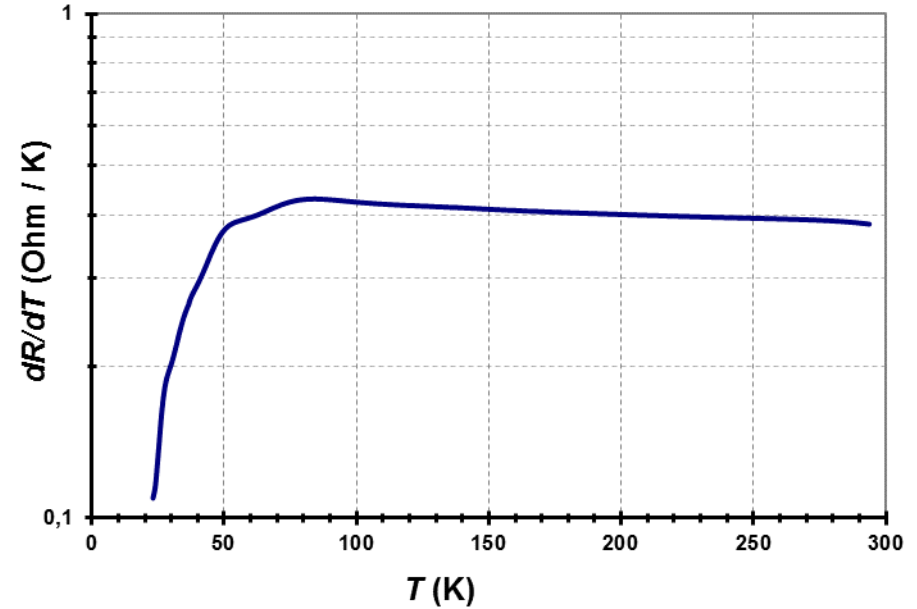
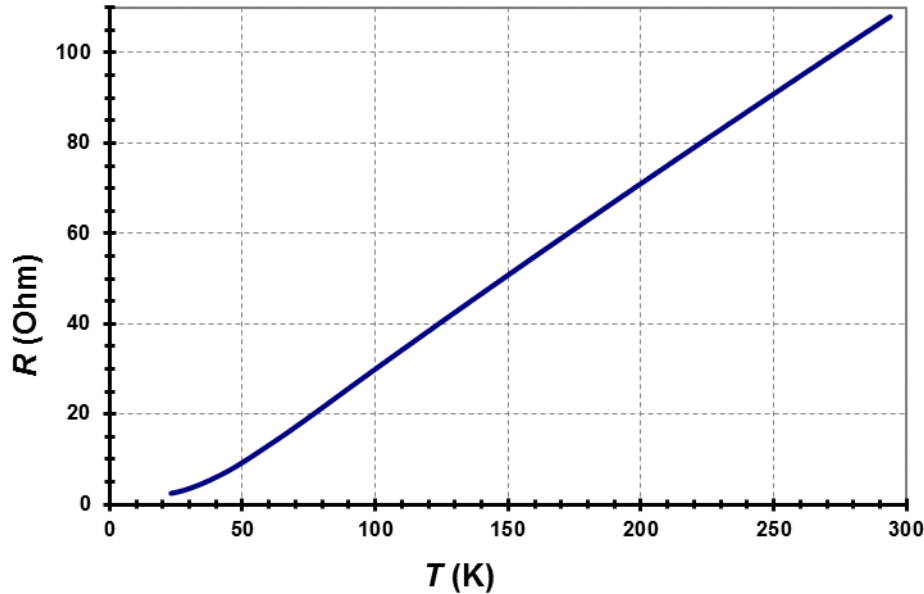


Généralités

- Les thermomètres à résistance de platine sont les thermomètres métalliques les plus utilisés (spécifiquement entre 80 K et 300 K)
- Utilisables pour $T > 30$ K
- Pour $T > 70$ K :
 - Interchangeables (fonction standard de la réponse statique) et incertitude en fonction de la classe de la sonde
 - Sensibilité quasi-constante et importante : $S \sim 0,4 \Omega/K$
- Pour $T < 70$ K : étalonnage nécessaire
- Faible coût
- Disponibles sous de nombreux conditionnements
- Bonne stabilité dans le temps
- Bonne reproductibilité
- Peu sensibles au champ magnétique (attention au conditionnement)
- Courant d'excitation : ~ 1 mA
- Temps de réponse : de quelques dizaines de ms à quelques secondes (dépend de la taille et du conditionnement de la sonde)



Réponse statique et sensibilité d'une PT100 (100Ω@0°C)



D'après la norme CEI 751

A	$3,9083 \cdot 10^{-3}$
B	$-5,775 \cdot 10^{-7}$
C	$-4,183 \cdot 10^{-12}$

C=0 pour les températures positives

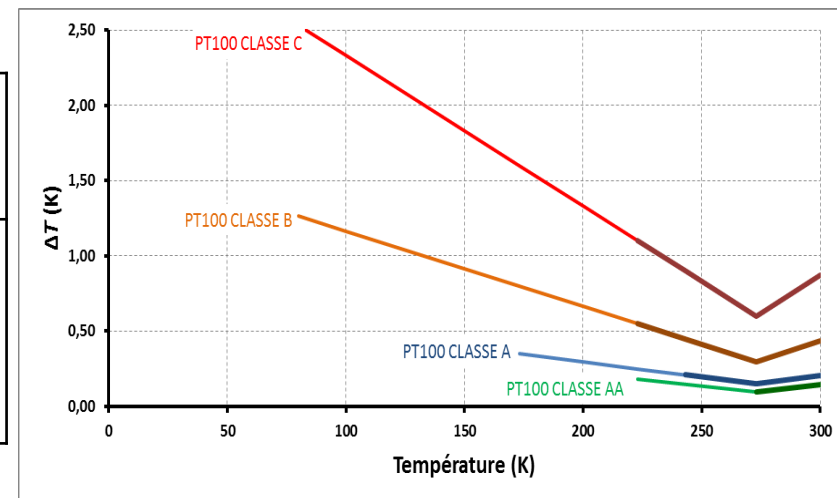
Différentes résistances nominales sont disponibles :
25 Ω, 100 Ω, 500 Ω, 1000 Ω

$$R=R_0 \cdot (1+A \cdot T+B \cdot T^2+C \cdot T^3 \cdot (T-100))$$

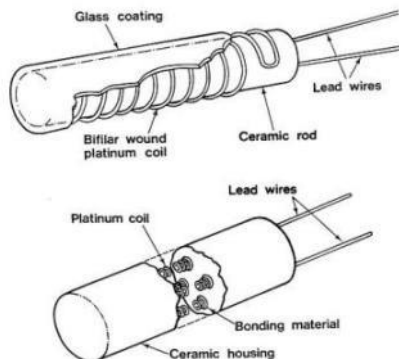
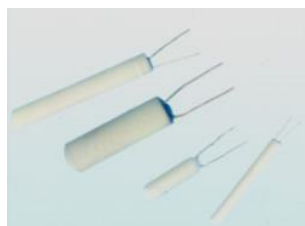


Conditionnement

Classe	Plage de température (°C)		Tolérance ΔT
	Résistance bobinée	Couche mince	
AA	-50 à + 250	0 à + 150	$\pm (0,10 + 0,0017 T)$
A	-100 à + 450	-30 à +300	$\pm (0,15 + 0,0020 T)$
B	-196 à + 600	-50 à +500	$\pm (0,30 + 0,0050 T)$
C	-196 à + 600	-50 à +500	$\pm (0,60 + 0,0100 T)$



• Sondes à résistance bobinées



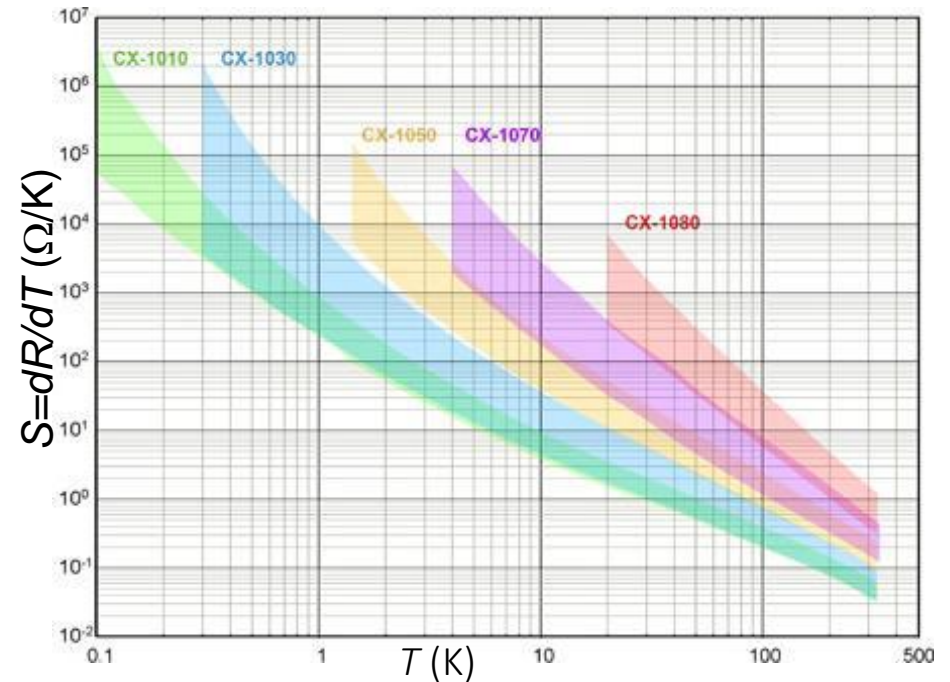
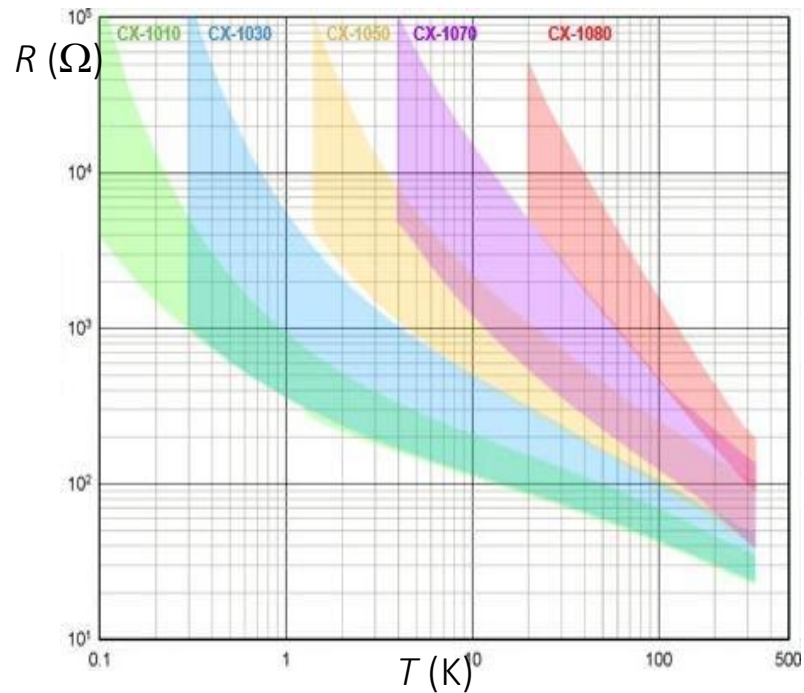
• Sondes à couche mince

➔ Fournisseurs potentiels : TC Direct, Pyrocontrôle, Prosensor, WIKA

Généralités

- Les capteurs Cernox (CX) sont fabriqués par la société Lake Shore Cryotronics
- Composition : couche mince d'Oxyde de Nitrure de Zirconium
- Différents modèles (CX-1010 ; CX-1030...) avec différentes courbes de réponses statiques \Rightarrow choix fonction de la plage de température
- Plage de température : 0,1 K à 420 K ;
- Bonne sensibilité
- Très bonne stabilité
- Très bonne résistance aux rayonnements ionisants
- Faible sensibilité aux champs magnétiques (surtout au-dessus de 30 K)
- Temps de réponse : quelques ms à 1 s
- Courant d'excitation : 1 à 10 μ A

Réponse statique et sensibilité

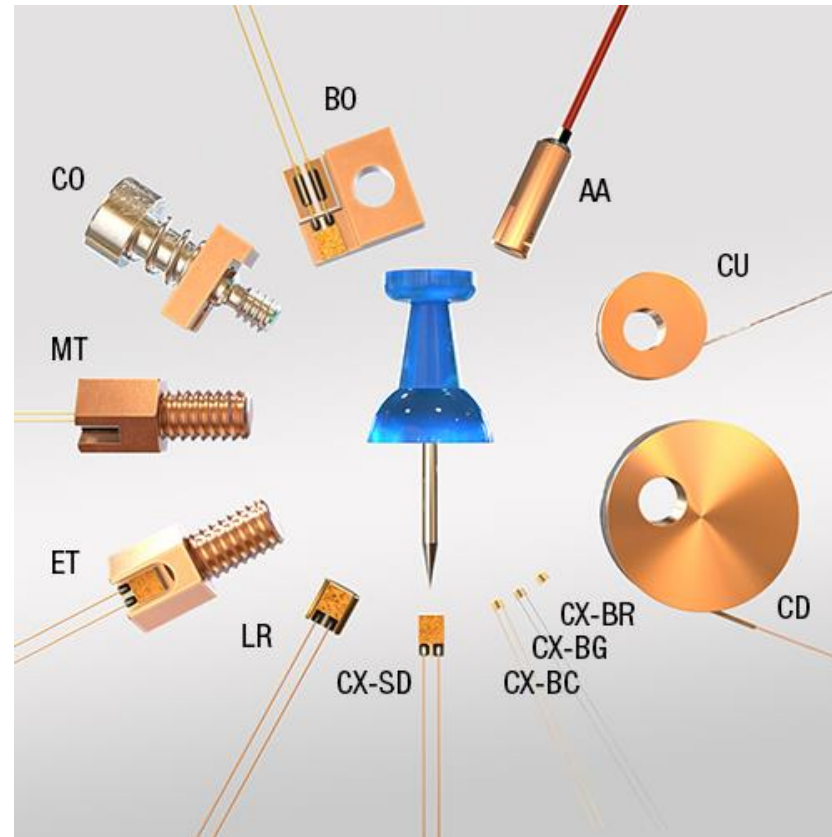


CX-1050 : $\approx 75\Omega @ 300K$; $\approx 10k\Omega @ 2K$

CX-1050 : $\approx 0,1\Omega/K @ 300K$; $\approx 10^4\Omega/K @ 2K$

NB : chaque capteur étant unique, sa caractéristique varie dans la plage indiquée

Conditionnement



➔ Fournisseur : Lake Shore Cryotronics via CryoForum



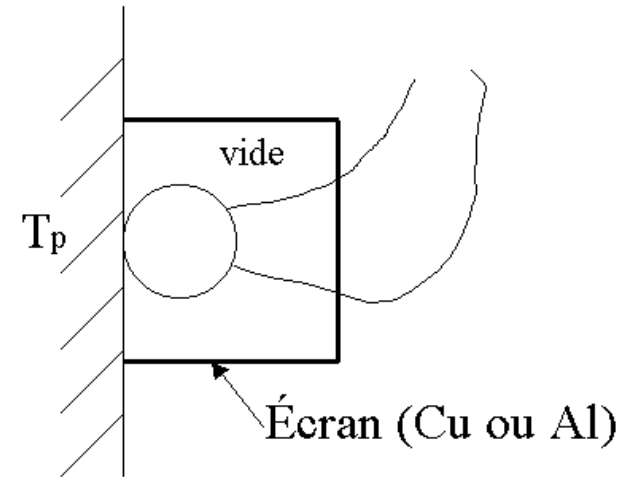
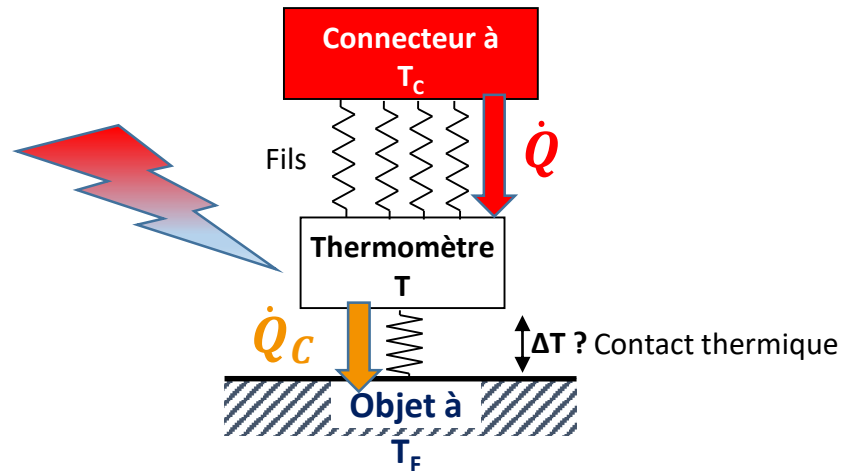
Thermométrie par contact – Comparaison et synthèse

	Pt	Cernox CX-1050	Thermocouple type K
Composition	fil bobiné, couches minces	couches minces en Oxyde Nitrure de Zirconium	2 fils de matériaux différents (Chrome- Alumel)
Plage de fonctionnement	14 K – 300 K	1.5 K – 300 K	80 à 300 K
Temps de réponse	10 ms à 2 s	15 ms – 400 ms	3 ms – 1s
Effet du champ magnétique	20 % à 2.5 T, 20 K	< 1% à 2.5 T, 4.2 K	3 % à 2.5 T, 10 K
Effet des rayonnements ionisants		2 mK à 1.8 K 10^{14} n/cm ²	
Encombrement	de la puce (quelques mm ³) au cylindre Ø 5mm, longueur 60 mm	de la puce (quelques mm ³) au cylindre Ø 3mm, longueur 8 mm	2 fils noués
Points forts	stabilité, interchangeabilité	sensibilité, reproductibilité, grande plage de mesure	interchangeabilité, faibles dimensions
Points faibles	faible sensibilité à basse température	non interchangeable	nécessité d'une référence de température
Coûts (€)	15 à 150	200	1 à 50



Précautions de montage

La température mesurée n'est pas celle de l'objet mais, au mieux, celle du capteur.



Il faut donc porter une attention particulière :

- aux apports de chaleur par rayonnement => écrans thermiques
- au contact thermique
- à l'apport de chaleur par les fils d'instrumentation
- à l'alimentation électrique du capteur

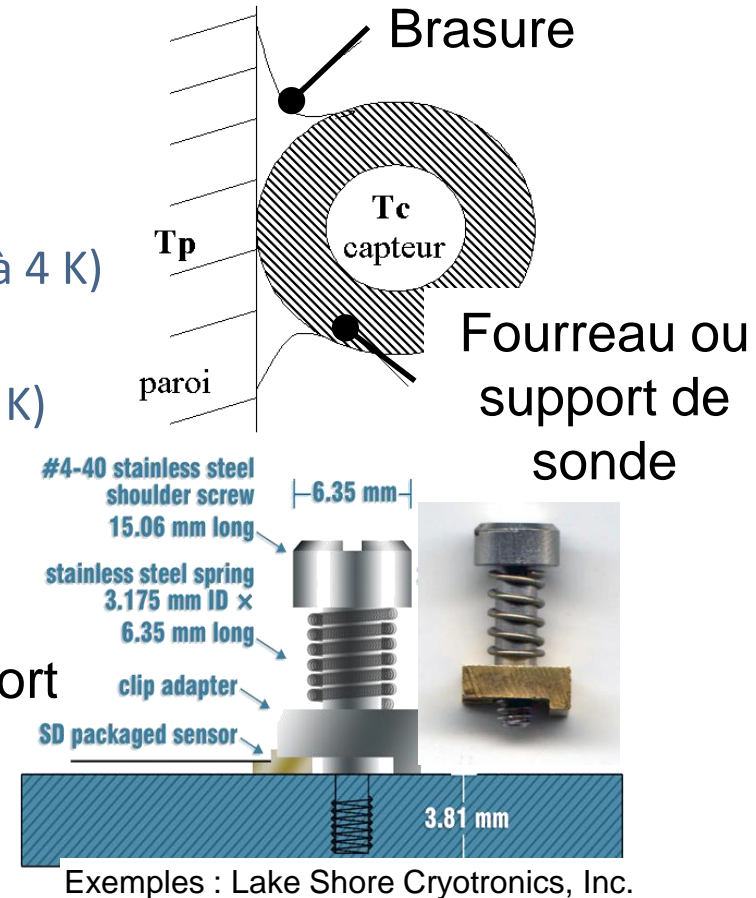


Le contact thermique

Pour minimiser la résistance de contact

- Matériau
 - faible rugosité des surface
 - nettoyage des surfaces
 - colle conductrice (ex. $k_{\text{Stycast 2850 FT} + \text{catalyst 9}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm/K à 4 K}$)
 - colle chargée (particules de cuivre)
 - appliquer de la graisse (Apiezon N, $k_{\text{graisse}} = 10^{-3} \text{ W/cm/K à 4 K}$)
 - matériau métallique ductile à basse température (indium)
 - augmenter la force de serrage du capteur sur le support (attention aux contraintes générées dans le capteur)
- Géométrie
 - augmenter la surface de contact
 - diminuer l'épaisseur du contact

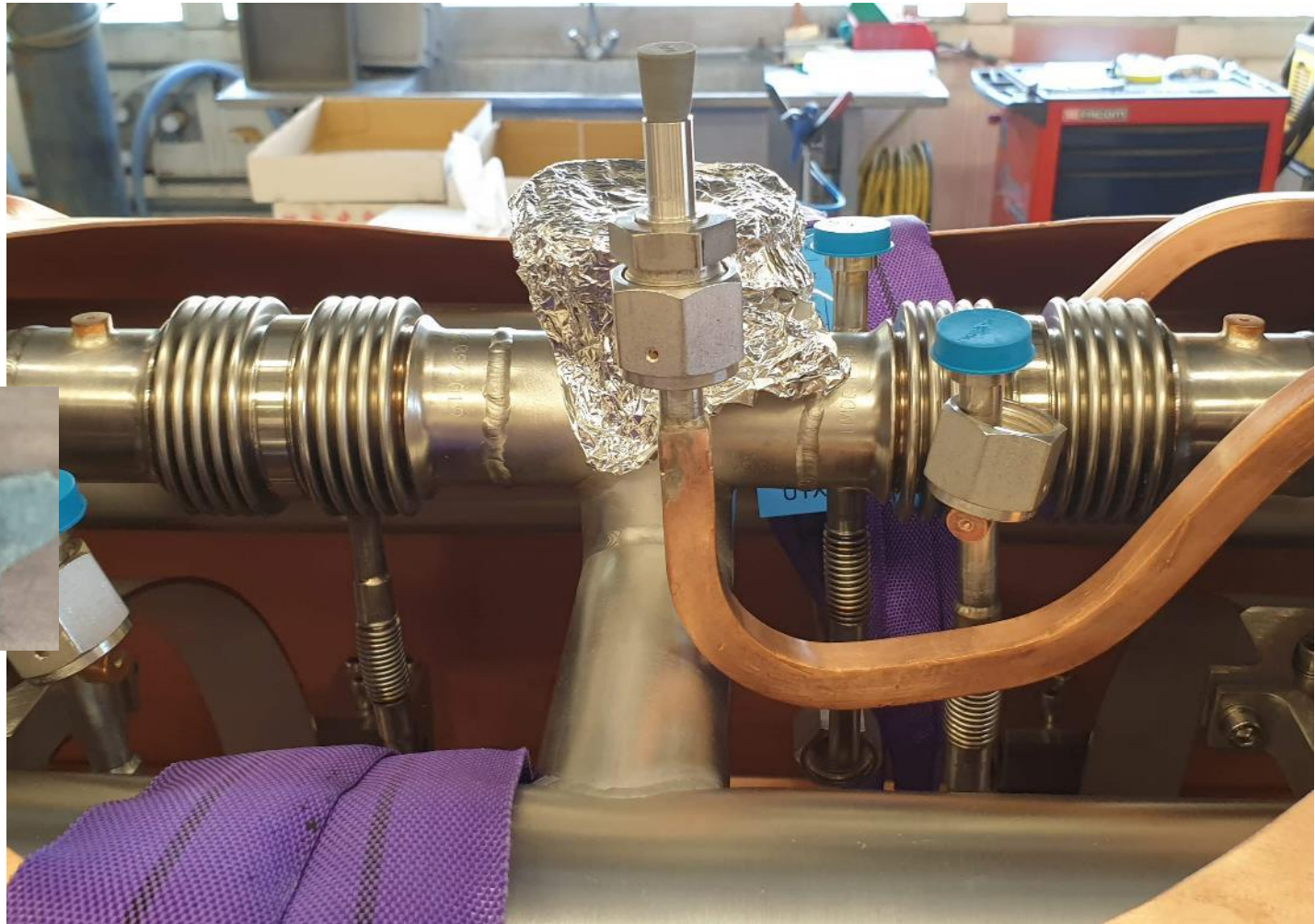
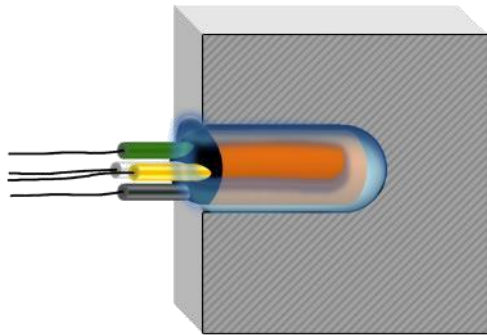
Clamp vissé à ressort





Le contact thermique

Exemple de support





Les fils d'instrumentation (1/2)

Pour minimiser l'apport de chaleur par les fils d'instrumentation

- Matériau : diminuer la conductivité thermique des fils

$$\text{bronze phosphoreux: } \int_4^{300} k_{94\text{Cu}-5\text{Sn}-2\text{P}}(T) \cdot dT \approx 119 \text{ W/cm}$$

$$\text{constantan: } \int_4^{300} k_{57\text{Cu}-43\text{Ni}}(T) \cdot dT \approx 60 \text{ W/cm}$$

$$\text{manganin: } \int_4^{300} k_{84\text{Cu}-12\text{Mn}-4\text{Ni}}(T) \cdot dT \approx 44 \text{ W/cm}$$

- Géométrie
 - diminuer le diamètre des conducteurs électriques
 - augmenter le chemin thermique (longueur des fils)

Wire gauge (AWG)	Wire diameter (in)	Wire diameter (mm)
30	0.01	0.255
32	0.00795	0.202
36	0.0055	0.127
42	0.0025	0.0635

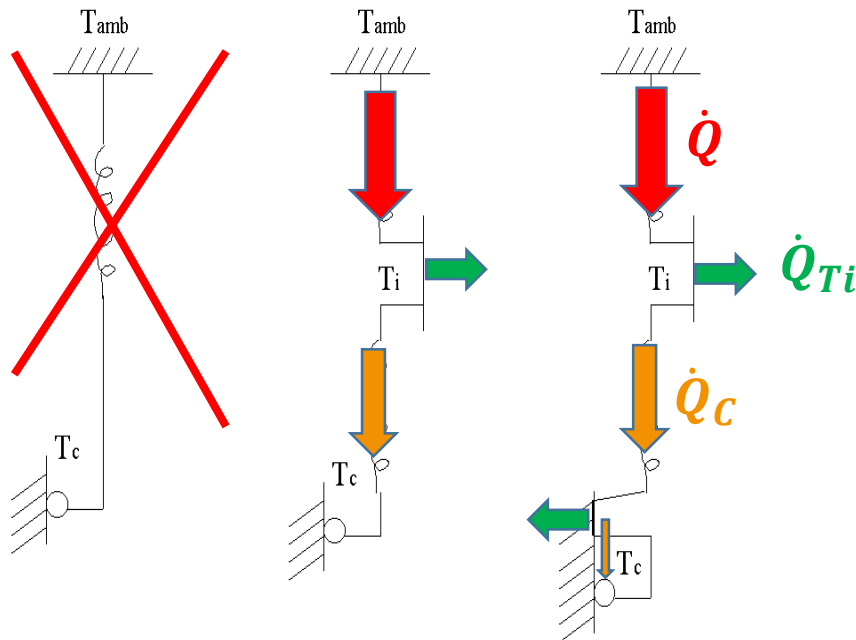


Les fils d'instrumentation

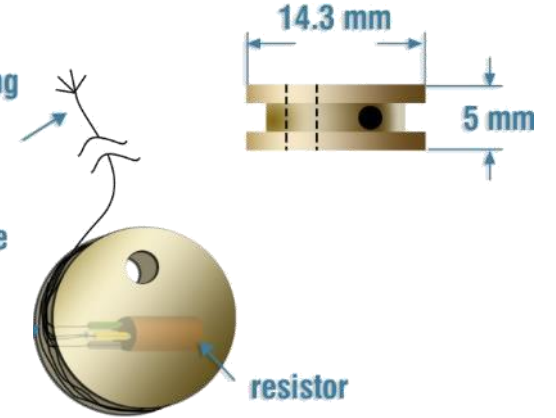
Pour minimiser l'apport de chaleur par les fils d'instrumentation

- Thermaliser les fils d'instrumentation : comment?

→ Thermalisation simple ou double



36-inch long
quad-lead
36 AWG
phosphor-
bronze wire



Fils thermalisés et maintenus par colle epoxy Stycast.





L'auto-échauffement du capteur

Pour minimiser l'apport de chaleur dû au fonctionnement du capteur

- Le passage d'un courant dans un matériau résistif entraîne la dissipation de chaleur par effet Joule
- Auto-échauffement du capteur induisant une erreur de mesure

A.N.:

- Fils: 4x fils $\varnothing=0,1$ mm ; $L=1$ m ;
Cuivre, bronze Phos, Constantan, manganin
- Contact : une épaisseur e de 0,5 mm de graisse sur une surface A de 0,1 cm² ;

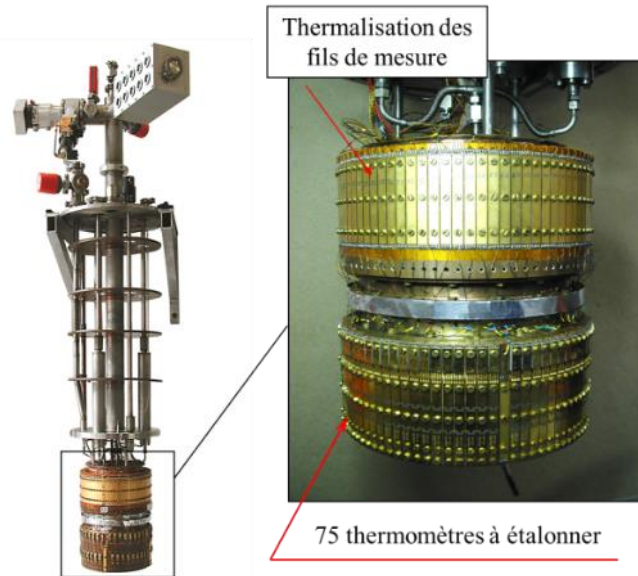
Quelle que soit le matériau des fils ($R_{fils} \gg R_{contact}$) :

$R_{Rh-Fe} = 1$ Ohms :	$I = 1$ mA $\Rightarrow \Delta T$ accru de 0,5 K
	$I = 0,1$ mA $\Rightarrow \Delta T$ accru de 0,005 K
$R_{Cx1050} = 40$ kOhms :	$I = 100$ μ A $\Rightarrow \Delta T$ accru de 0,2 K
	$I = 10$ μ A $\Rightarrow \Delta T$ accru de 0,002 K



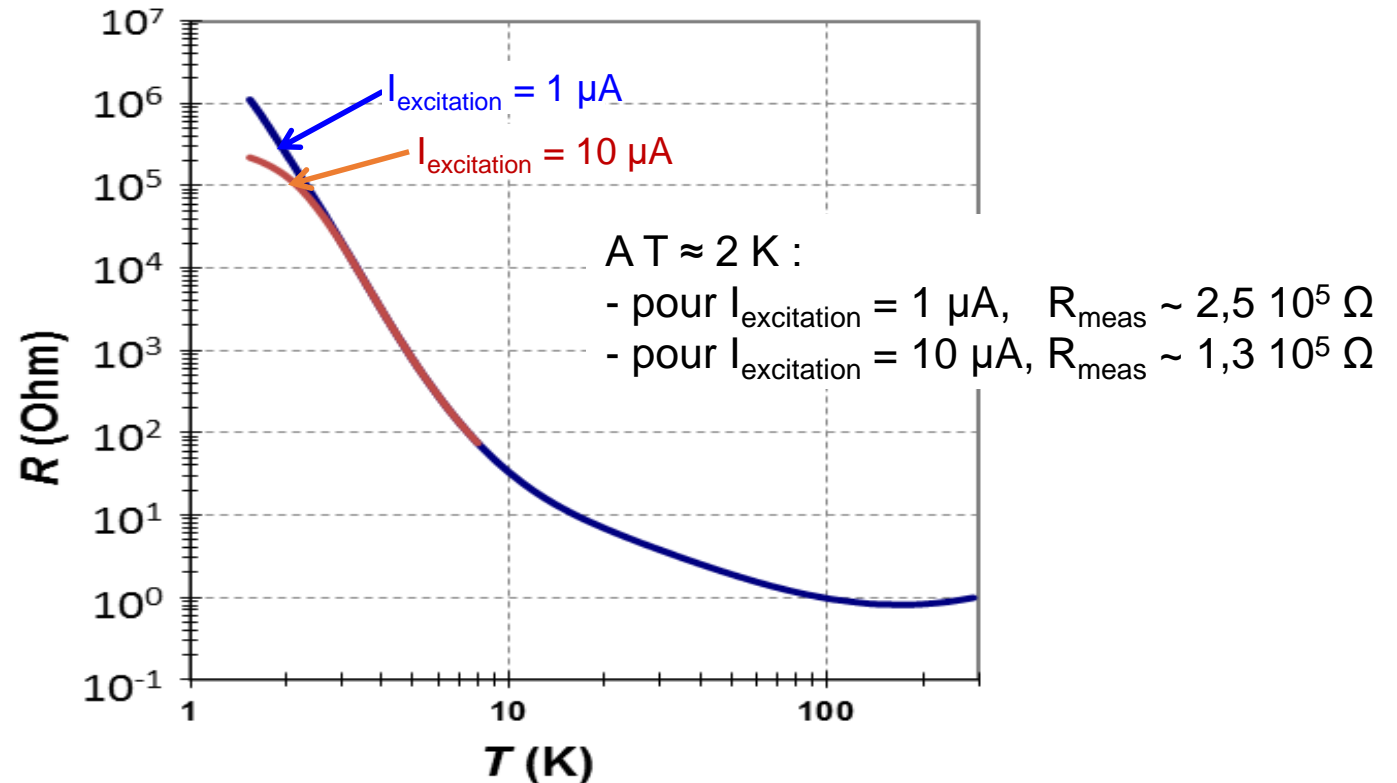
L'auto-échauffement du capteur

Exemple



Thermomètre monté sous vide et alimenté en courant

Courbe d'étalonnage (réponse statique)





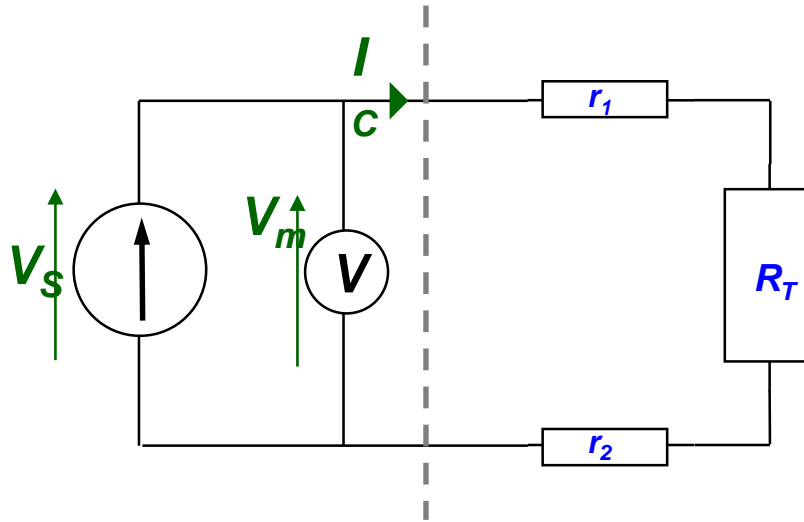
Mesure de résistance – Montage 2 fils

✓ Montage simple

✗ La résistance des fils est prise en compte dans la mesure de la résistance totale

✗ La résistance des fils varie avec (le gradient de) la température

➡ C'est une source d'erreur importante dans ce montage que l'on réalisera donc uniquement si la précision de mesure n'est pas un critère important



r_1, r_2, r_3, r_4 : résistances des fils

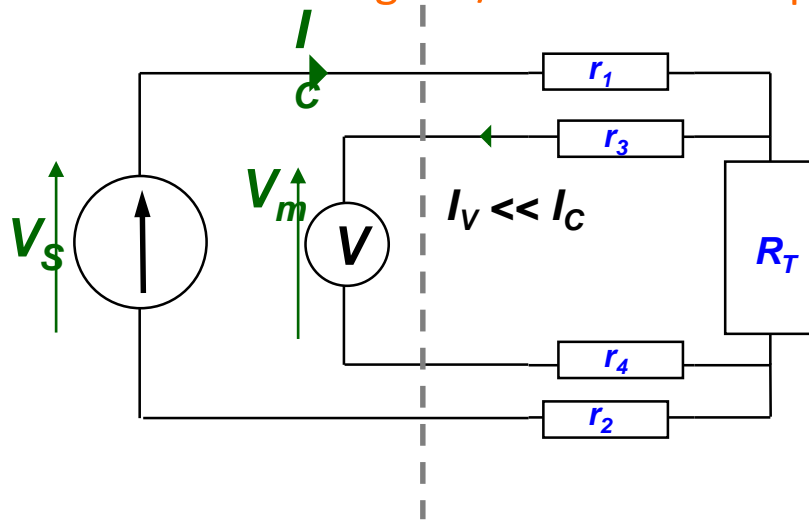
R_V : résistance du voltmètre

$$V_m = I_C \cdot (R_T + r_1 + r_2)$$



Mesure de résistance – Montage 4 fils

- ✓ La résistance des fils d'instrumentation n'intervient pas
- ✓ Montage à privilégier lorsque les variations des résistances des fils sont importantes
- ✗ Montage plus coûteux et contraignant
- △ Attention à la stabilité de la source de tension/courant
- △ Attention à la tension de décalage et/ou thermocouple



r_1, r_2, r_3, r_4 : résistances des fils

R_V : résistance du voltmètre

$$V_S = I_C \cdot (R_T + r_1 + r_2)$$

$$V_m = I_C \cdot R_V \cdot \frac{R_T}{R_V + R_T + r_3 + r_4}$$

si $R_V \gg R_T + r_3 + r_4$ alors :

$$V_m = I_C \cdot R_T$$



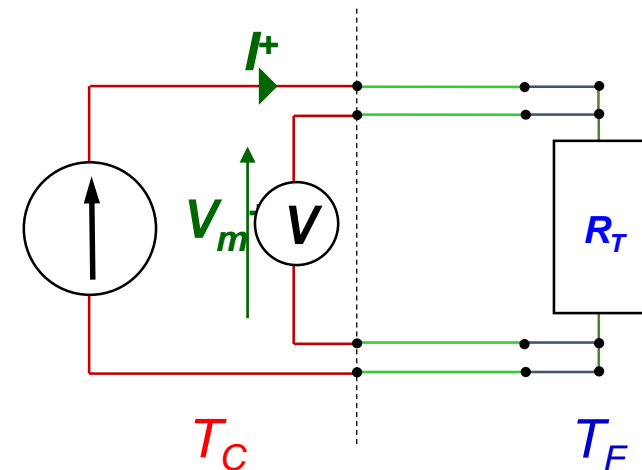
Tensions thermoélectriques

- Cause : deux métaux différents joints soumis à un gradient de température
- Effet : génération d'une fem (principe du thermocouple).
- Le raccordement électrique des thermomètres peut être la source de fem thermoélectriques.
- Ces fem modifient la tension mesurée qui n'est plus celle au borne du thermomètre
- Pour les supprimer, on inverse le courant d'alimentation ce qui inverse la tension mesure mais pas les tensions thermoélectriques:

$$V_m^+ = R_T \times I^+ + V_{EMF}$$

$$\Rightarrow (V_m^+ - V_m^-) / 2 = R_T \times I^+$$

$$V_m^- = R_T \times I^- + V_{EMF}$$





Matériel d'acquisition et solutions de supervision



Source de courant
100nA – 100mA



Automate logique programmable
PT100, TC



Centrale d'acquisition (multiplexeur) Conditionneur TC,PT100
PT100, TC



Nanovoltmètre



Excitation en tension ou courant alternatif

- Principe :
 - Source de tension ou de courant alternatif
 - Mesure de l'impédance de la sonde par détection synchrone
 - Avantages :
 - La composante continue est de fait supprimée (dont les fem thermoélectriques)
 - La puissance dissipée par effet Joule (RMS) est plus faible
 - Par filtrage, il est possible d'extraire plus facilement le signal de mesure du bruit
- ⇒ Certains conditionneurs de thermistances disponibles sur le marché utilisent ce principe

➔ Fournisseur : Lake Shore Cryotronics via CryoForum, SEICO



Model 240-2P

- Exemple de matériel
- Modèle 240 2 ou 8 voies (Lake Shore Cryotronics)



Model 240-8P



CABTR 8 ou 40 voies (CEA)



Comparaison CABTF / CABTR

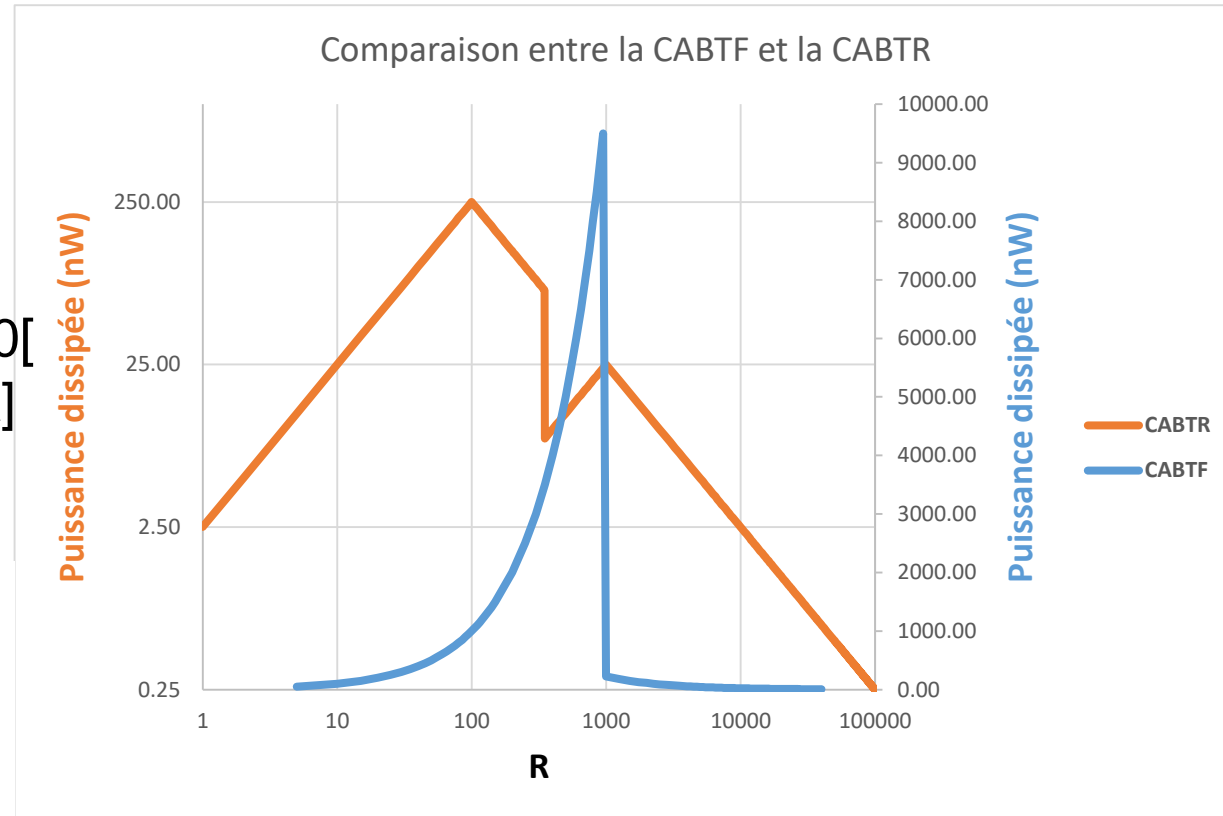
- Puissance dissipée

CABTF

Excitation $100\mu\text{A}$ pour $R(\Omega) \in [0 - 1000[$
Excitation 15mV pour $R(\Omega) \in [1\text{k} - 40\text{k}]$

CABTR

R	Source	Niveau
1 à 100 Ω	Courant constant	$50\mu\text{A}$
100 Ω à 350 Ω	Tension constante	5mV
350 Ω à 1 k Ω	Courant constant	$5\mu\text{A}$
1 k Ω à 100 k Ω	Tension constant	5mV





- I. Introduction
- II. Documenter l'instrumentation
- III. Rappels sur les capteurs
- IV. Thermométrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
 - Mise en œuvre
 - Acquisition
- V. Débitmétrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VI. Mesure de pression
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VII. Bilan de puissance
- VIII. Conclusion



Quelques technologies de débitmètres

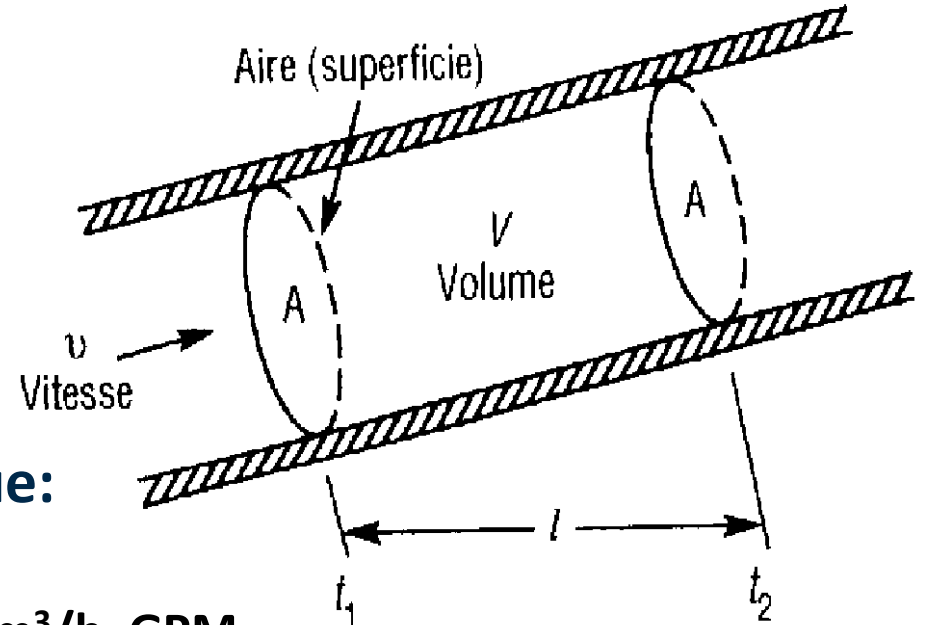
- A flotteur
- Tube de Pitot
- Organe déprimogène (diaphragme, tuyère, Venturi)
- Vortex
- Electromagnétique
- Ultrasons
- Turbine

• Volumique

- Palettes
- Roues ovales
- Paroi déformable
- Pistons rotatifs (type roots)

• Massique

- Coriolis
- Massique thermique
 - à insertion
 - à dérivation



Débit volumique:

$$\dot{V} = v \cdot A$$

Unités: m^3/s , m^3/h , GPM.

Débit massique:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

Unités: kg/s , lb/s ,...



Electromagnétique

$$f.e.m. = B \times D \times v$$

$f.e.m$ (V)

B (T)

D (m)

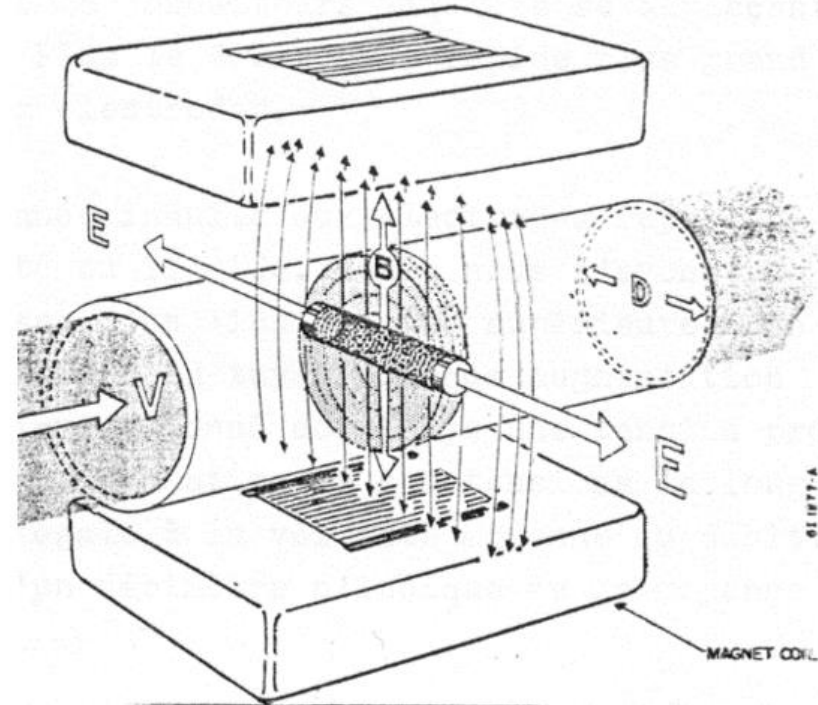
v ($m \cdot s^{-1}$)

Qualités :

- Mesure en régime laminaire ou en régime turbulent
- Échelle très linéaire
- Perte de charge nulle
- Exactitude de l'ordre de $\pm 1 \%$
- Dynamique de mesure de 20:1
- Sortie 0-10V, 4-20mA, 0-20mA,...

Limites :

- Exige un liquide conducteur
- Vitesse d'écoulement > 1 m/sec.



Tension générée:

12 mV à 3 l/s (25 mm);

7 mV à 0.5 m³/s (300 mm).





Compteur à roues ovales

Qualités :

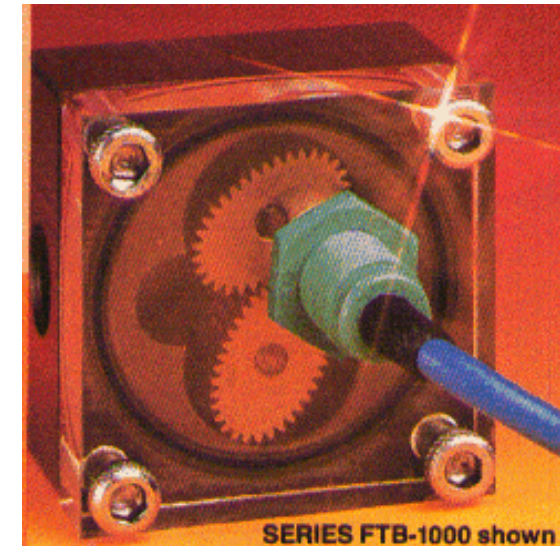
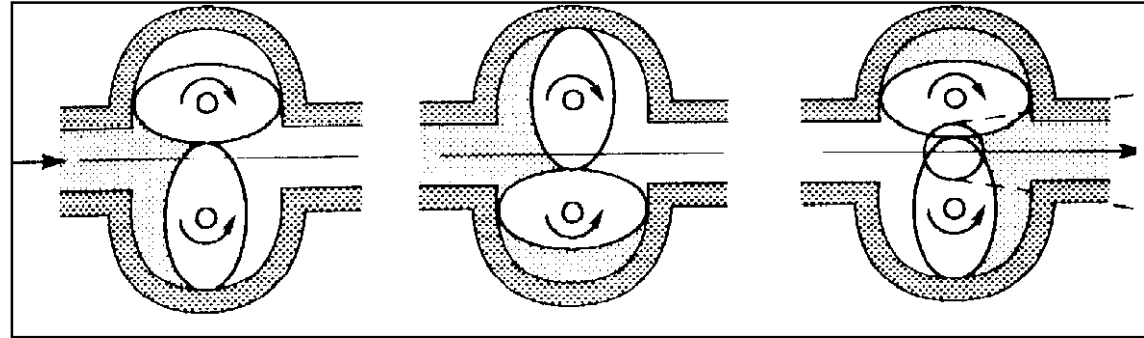
- Grande plage de mesure
- Exactitude : +/- 0.2 à 0.5 % de la mesure;
- Dynamique de mesure 10:1 à 25:1

Limites :

- Débit maximum de 1600 m³/h
- Grande perte de charge

Précautions d'utilisation :

- Placer un filtre en amont
- Attention lors de la mise en service!





Compteur à paroi déformable : comptabilise le volume le traversant

Utilisation :

- Très utilisé (compteur à gaz de la maison)
- Δp admissible ≈ 200 à 1500 mbar,
- Débits de $10 \text{ dm}^3/\text{h}$ à $65 \text{ m}^3/\text{h}$

Qualités :

- Grande plage de mesure
- Exactitude ($\sim 1\%$)
- Emetteur d'impulsion en option permettant une acquisition informatisée et totaliseur

Limites :

- Plage de pression de fonctionnement limitée.
- Surtout ne fonctionne pas en dépression! (en deçà pression atmosphérique)





Compteur à pistons rotatifs (type roots)

Principe :

L'écoulement du gaz provoque la rotation de deux pistons contrarotatifs.

Utilisation :

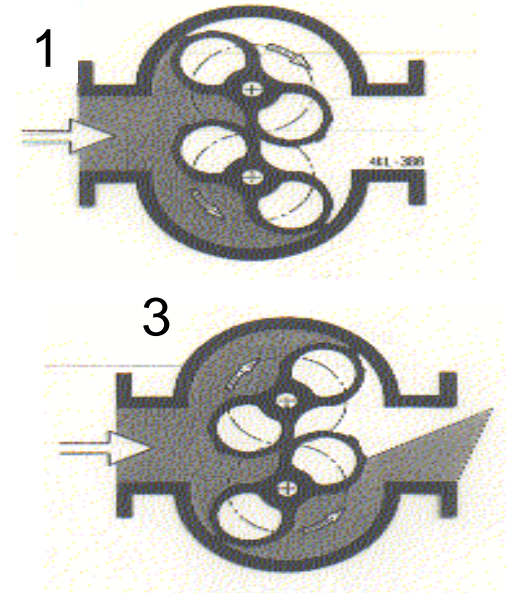
- Débit de $1\text{m}^3/\text{h}$ à $1500\text{m}^3/\text{h}$,
- p admissible ≈ 1 à 90 bars,

Qualités :

- Exactitude $< 0.5\%$,
- Grande dynamique de mesure : 20 à 200,
- Emetteur d'impulsions et totalisateur



► Delta 2050/2080/2100 - Aluminium



Ces deux derniers modèles permettent de faire un bilan de masse.



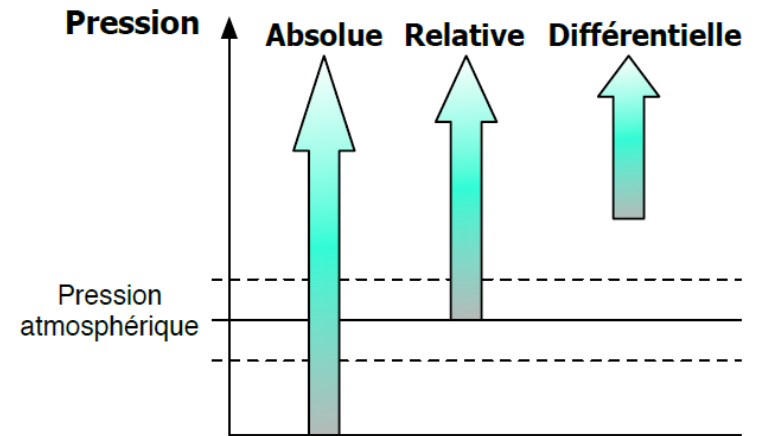
- I. Introduction
- II. Documenter l'instrumentation
- III. Rappels sur les capteurs
- IV. Thermométrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
 - Mise en œuvre
 - Acquisition
- V. Débitmétrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VI. Mesure de pression
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VII. Bilan de puissance
- VIII. Conclusion



Quelques technologies de capteur de pression

$$P = \frac{F}{S}$$

P (Pa)
 F (N)
 S (m^2)



La pression peut être déduite à partir de la détermination d'une force ou d'un déplacement (induit par l'application d'une force)

➔ Technologie

- Effet piezoélectrique
- Capacitif
- Jauges extensiométriques



Capteur piézo-résistif

Principe :

Il est possible de mesurer la déformation d'une membrane par un cristal piézoélectrique

Utilisation :

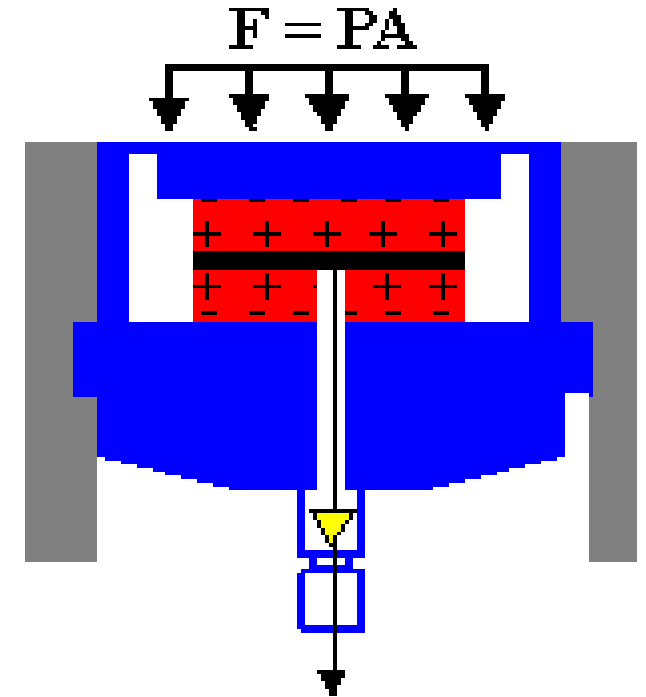
- gaz, liquide
- 1 mbar à 1000 bars

Qualités :

- Coût modéré
- Faible dimension
- Exactitude : 0.01% à 1% de l'EM
- Dynamique de mesure de 50:1
- Bonne réponse en fréquence

Limites :

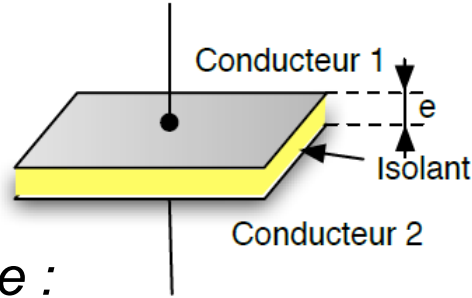
- Sensible à la température



Pressure Sensor



Capteur capacitif



$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times \frac{S}{e}$$

$C(F)$

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$, permittivité du vide (F/m)

ϵ_r , permittivité relative de l'isolant (F/m)

$S (m^2)$

$e(m)$

Principe :

La déformation de la membrane du capteur modifie la capacité de la cellule de mesure

Utilisation :

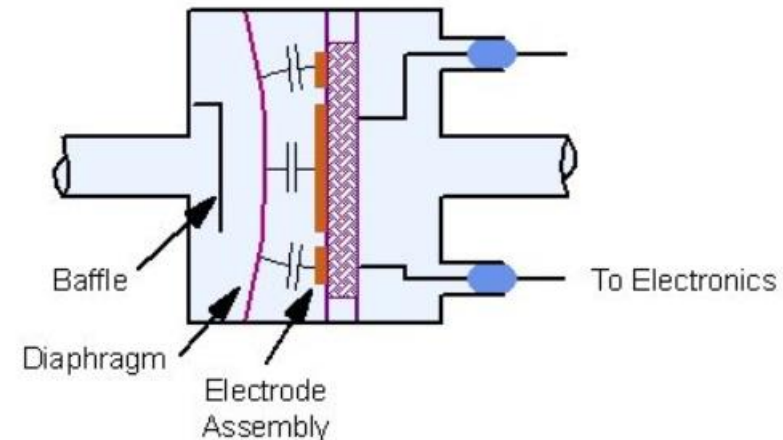
- gaz, liquide
- 0 - 0.25 mbar à 0 - 670 bar

Qualités :

- Exactitude : 0.025% de l'étendue de mesure à 0.1% de l'EM

Limites :

- Encombrement





Capteur à jauges de contraintes

Principe :

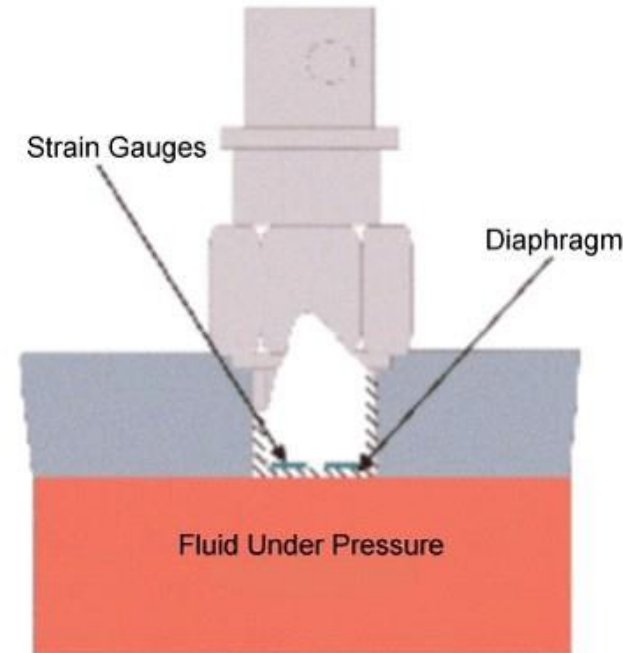
Il est possible de mesurer la déformation d'une membrane par l'utilisation de jauges de contraintes (ou d'extensiométrie)

Utilisation :

- Débit de $1\text{m}^3/\text{h}$ à $1500\text{m}^3/\text{h}$,
- p admissible ≈ 1 à 90 bars,

Qualités :

- Exactitude $< 0.5\%$,
- Grande dynamique de mesure : 20 à 200 ,
- Emetteur d'impulsions et totalisateur





- I. Introduction
- II. Documenter l'instrumentation
- III. Rappels sur les capteurs
- IV. Thermométrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
 - Mise en œuvre
 - Acquisition
- V. Débitmétrie
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VI. Mesure de pression
 - Principe de mesure et caractéristiques de capteurs
- VII. Bilan de puissance
- VIII. Conclusion



Bilan de puissance – Cas sans changement de phase

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T = \rho \times \dot{V} \times C_p \times \Delta T$$

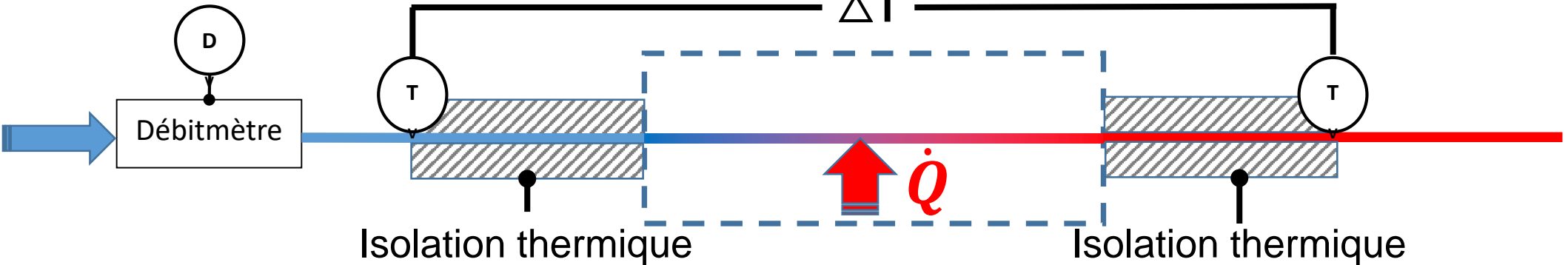
\dot{Q} puissance thermique (W)

\dot{m} débit massique ($kg \cdot s^{-1}$)

C_p capacité calorifique à pression constante ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

T température (K)

ΔT



➔ ΔT doit être significatif/performance de la chaîne de mesure

Trier les thermocouples (appairage), montage différentiel ou étalonnage

➔ Etat stationnaire!

➔ pas d'évolution temporelle des températures



$$\dot{Q} = \dot{m} \times L_V = \rho \times \dot{V} \times L_V$$

\dot{Q} puissance thermique (W)

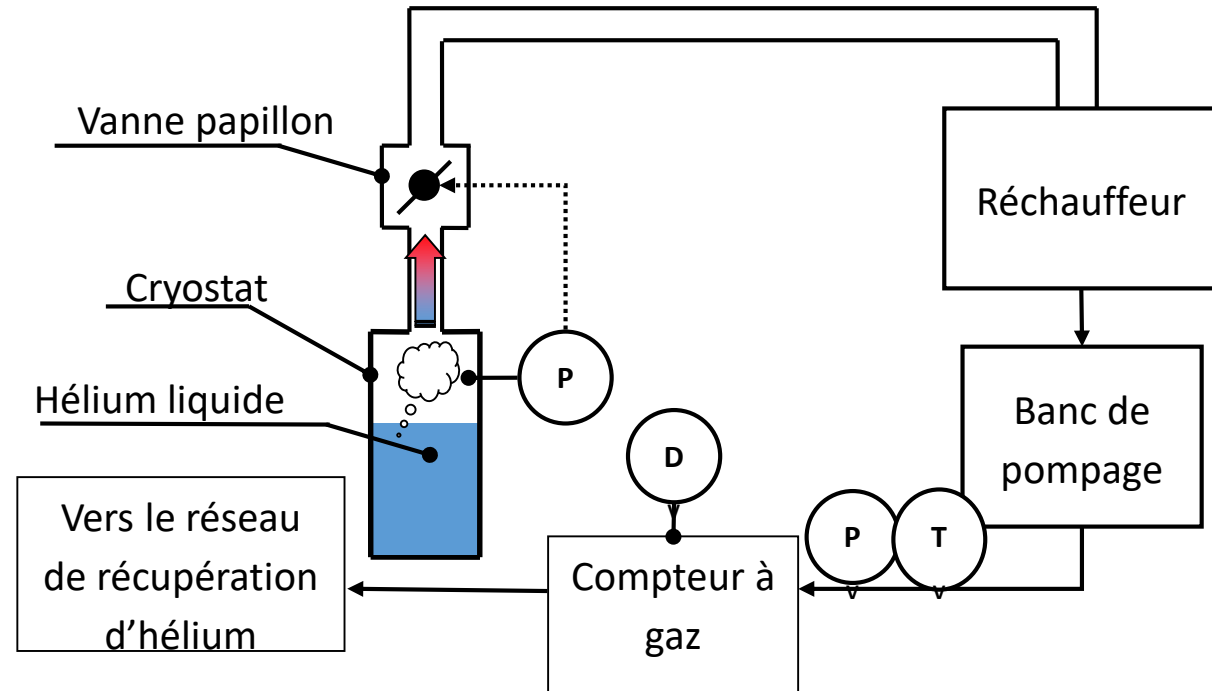
\dot{m} débit massique ($kg \cdot s^{-1}$)

L_V chaleur latente de vaporisation ($J \cdot kg^{-1}$)

➔ **Etat stationnaire!**

➔ pas d'évolution temporelle des températures

➔ niveau maintenu constant





Conclusion

- **Notions générales sur les capteurs**
 - Terminologie (justesse, finesse, exactitude, étendue de mesure)
 - Critères de choix d'un capteur
- **Thermomètres (TC, PT100, Cernox™)**
 - Principe de mesure
 - Caractéristiques
 - Mise en œuvre
- **Débitmètres (Roues ovales, pistons rotatifs, électromagnétique, paroi déformable)**
 - Principe de mesure
 - Caractéristiques
- **Pression (Piezorésistif, jauges de contraintes, capacitif)**
 - Principe de mesure
 - Caractéristiques
- **Bilan thermiques : principes et précautions**

Merci de votre attention



Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie
IJCLab - UMR9012 - Bât. 100 - 15 rue Georges Clémenceau
91405 Orsay cedex



université
PARIS-SACLAY

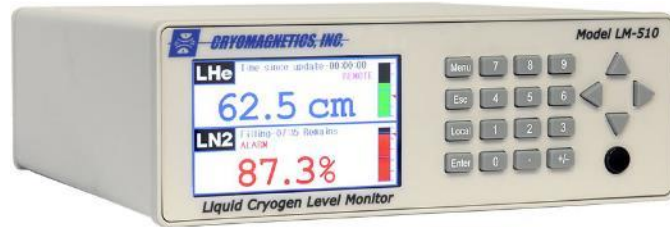
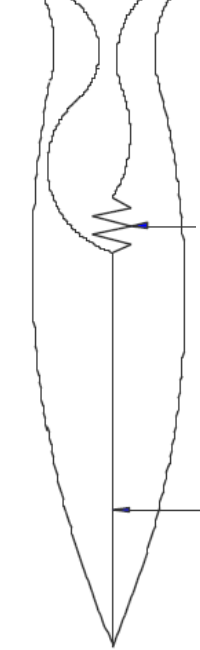




Niveau d'hélium liquide

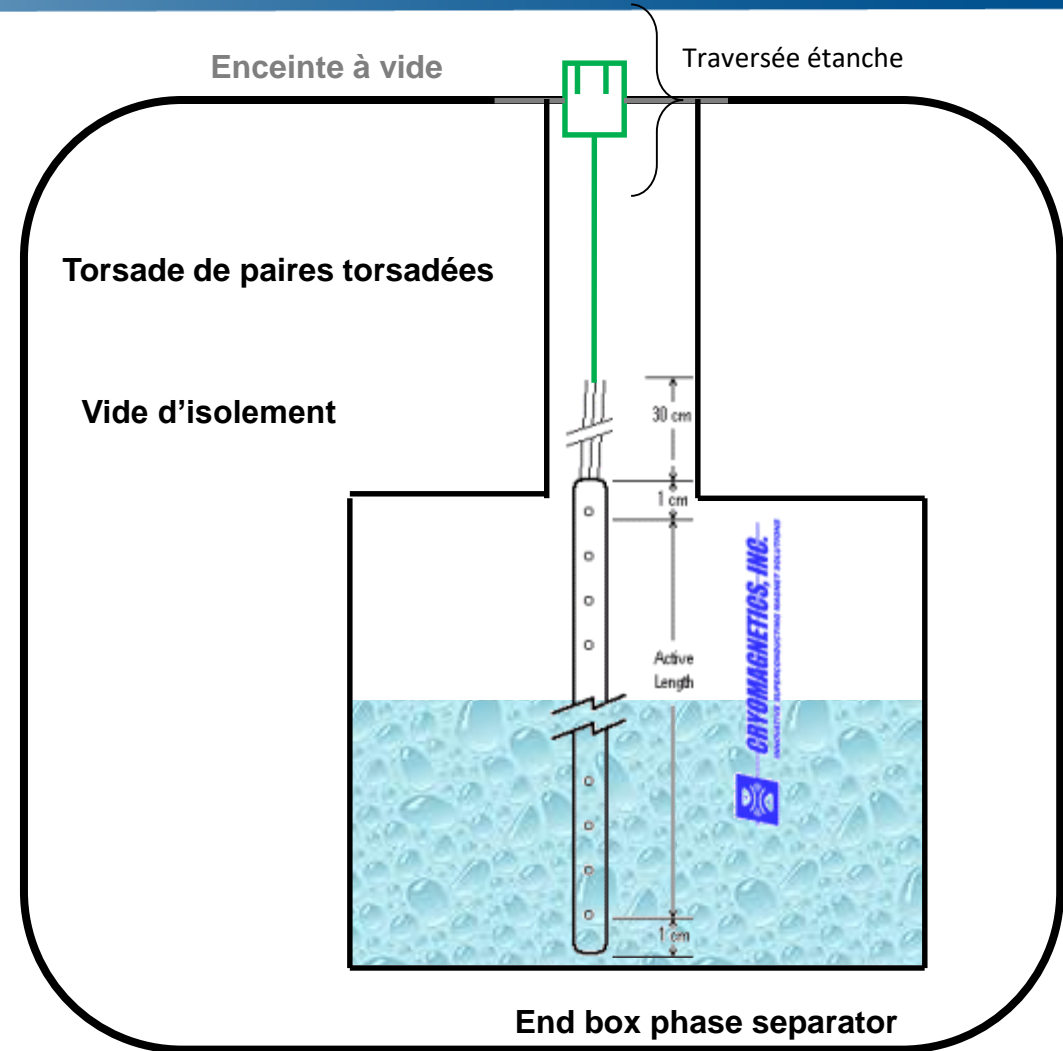
Sonde de niveau supraconductrice

V- V+ I+ I-



Courant d'alimentation $\approx 70\text{mA}$
 $\approx 4.55\text{ Ohm/cm}$ (état normal)

Longueur active jusqu'à deux mètres en version standard





Les fils d'instrumentation

Pour minimiser l'apport de chaleur par les fils d'instrumentation

- Thermaliser les fils d'instrumentation : où? Exemple d'une masse froide à 4K

