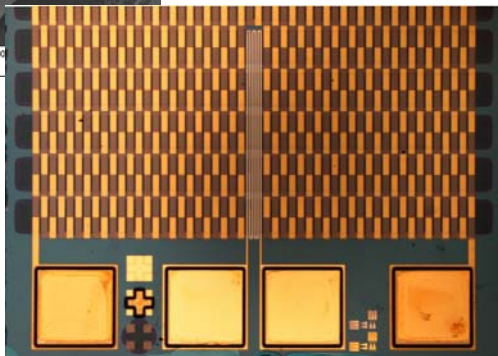
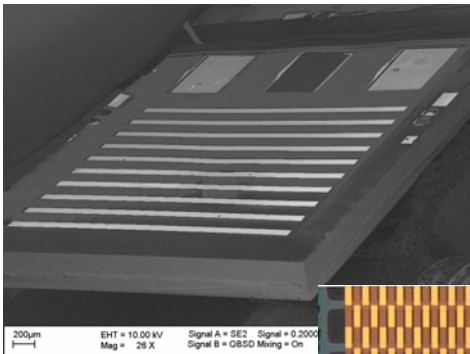




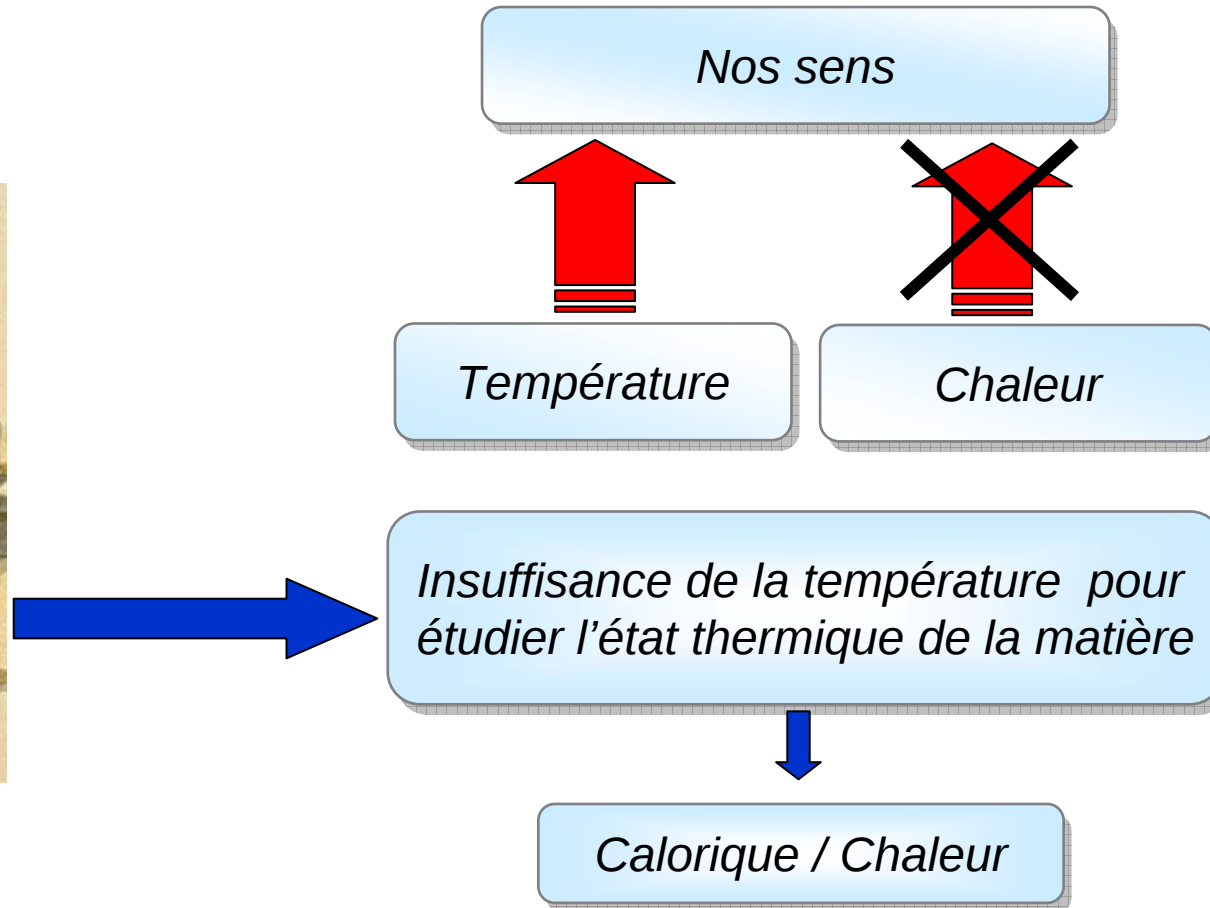
Développement de nouveaux microcapteurs de flux thermiques - Applications aux contrôles de systèmes thermiques

K. ZIOUCHE, P. LEJEUNE, D. LECLERCQ,

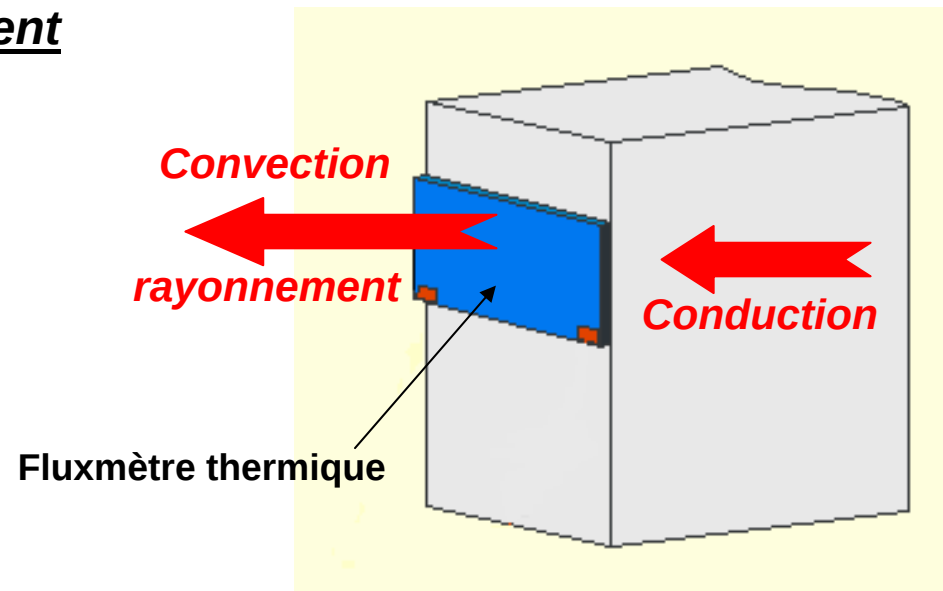


Corte, 13 juin 2013

LAVOISIER



Échanges d'énergie entre un corps et son environnement



SOLUTION IDEALE :

- Le fluxmètre doit être un capteur de flux thermique total
- Ne pas perturber les échanges thermiques du corps à étudier
- Faible coût de fabrication

Grandeurs accessibles à la mesure

ELECTRICITE

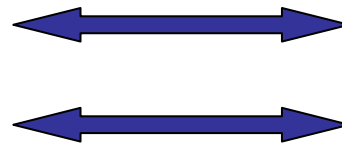
Différence de potentiel (V)

Courant (A)

THERMIQUE

Température (K)

Flux thermique (W)



Mesure de la température

Capteurs en contact avec le corps (sondes platine , thermocouples , CTN)

Capteurs sans contact avec le corps (détection du rayonnement infrarouge émis par le corps)
Fabricant important (Dexter , USA)

Mesure du flux thermique

Très peu de capteurs de ce type disponibles sur le marché mondial : Fabricants identifiés : (Vatel , USA et Captec , Fr , dans les deux cas capteurs très coûteux)

Avantage de la mesure de flux thermique permet d'anticiper la variation de température



Fluxmètre Wuntronic :

Dimensions 7.4x10.7mm²
 Epaisseur 1.5 mm
 Temps de réponse 3 s
 Sensibilité 18 $\mu\text{V.m}^2/\text{W}$
 Température 148.5 °C

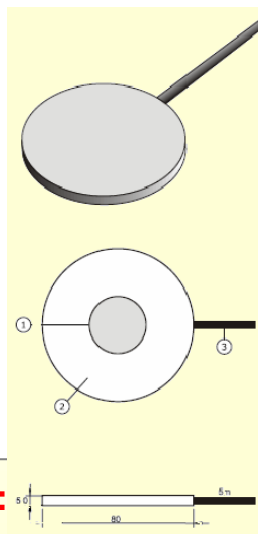
Fluxmètre Captec :

Dimensions 10x10 mm²
 Epaisseur 420 μm
 Temps de réponse 150 ms
 Sensibilité 0.3 $\mu\text{V.m}^2/\text{W}$
 Température 200 °C



Fluxmètre Vatel :

Dimensions 10x10mm²
 Epaisseur 0.25 mm
 Temps de réponse 0.9 s
 Sensibilité 0.1 $\mu\text{V.m}^2/\text{W}$
 Température 150 °C

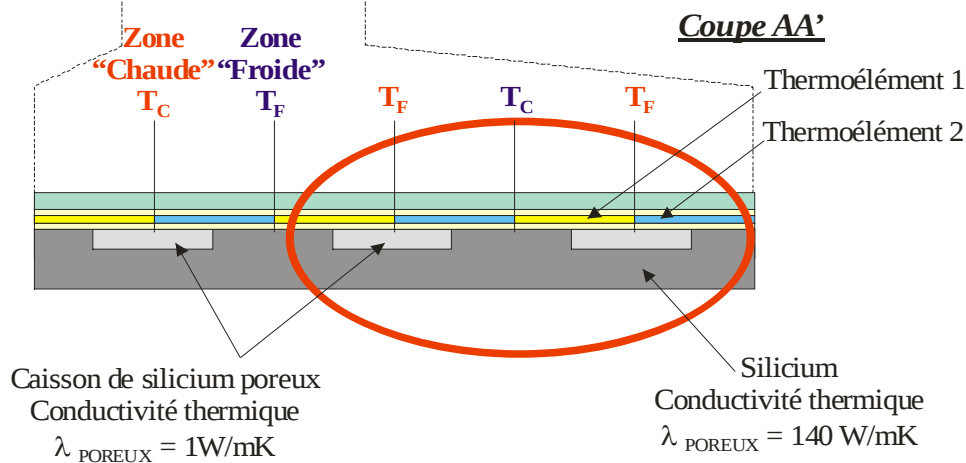
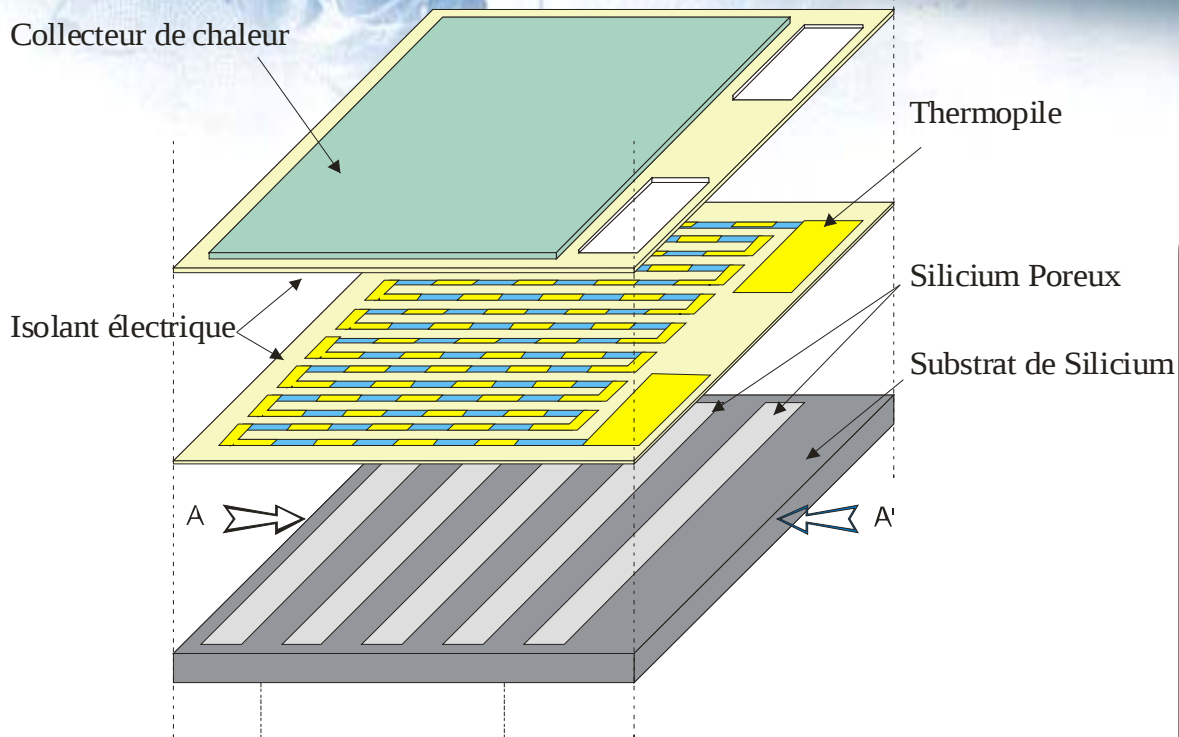


Fluxmètre Hukseflux :

Dimensions 80 mm Ø
 Epaisseur 5 mm
 Temps de réponse 240 s
 Sensibilité 50 $\mu\text{V.m}^2/\text{W}$
 Température 70 °C

- Coûteux
- Résistance thermique élevée
- Limite en température
- Non compatible CMOS

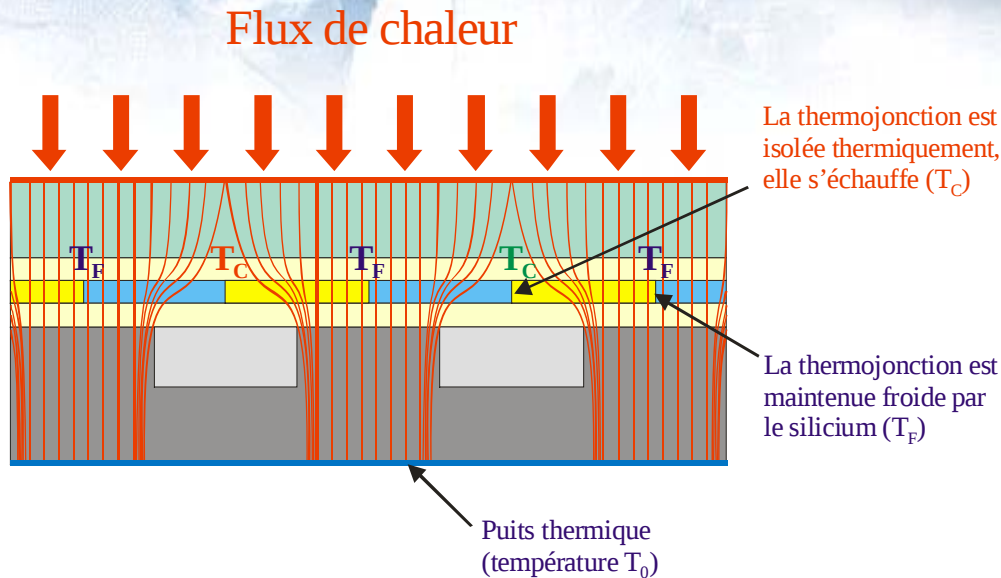
Fluxmètre thermique à simple déflexion de flux



Le fluxmètre constitué de 3 parties fonctionnelles :

- **Revêtement supérieur :** Collecte la chaleur
- **Élément de détection :** Thermopile en polysilicium dopée alternativement Bore et Phosphore (pouvoir thermoélectrique compensé)
- **Substrat anodisé sélectivement :** Evacuation thermique dissymétrique

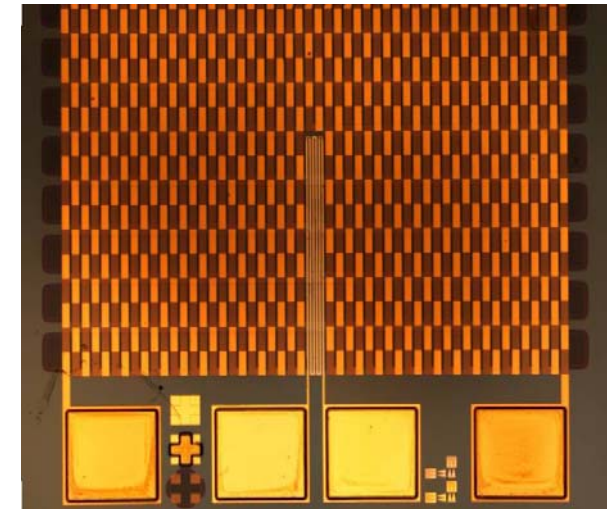
**Capteur technologie silicium innovant :
BREVET international IEMN / CNRS 2009**



La chaleur est distribuée périodiquement vers une thermojonction sur deux. Celles qui se situent au dessus du silicium sont maintenue à une température quasi froide (T_F), les autres isolées thermiquement voient leur température s'élever (T_C).

Les gradients thermiques générés sont détectés par la thermopile et transformés en f.e.m. Seebeck

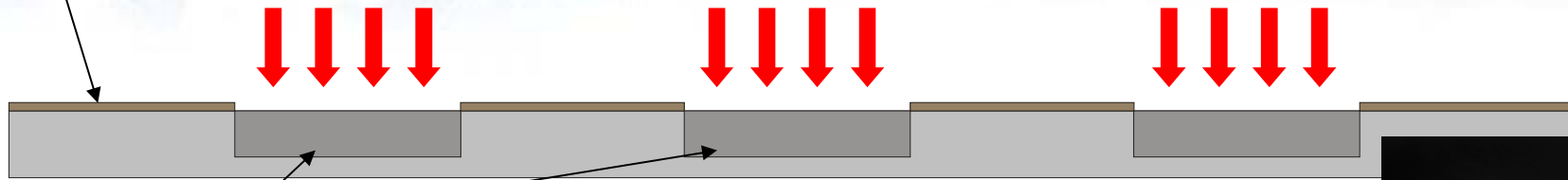
$$V_{\text{SEEBECK}} = N \cdot \Delta\alpha_{\text{POLYSILICIUM}} \cdot \Delta T$$



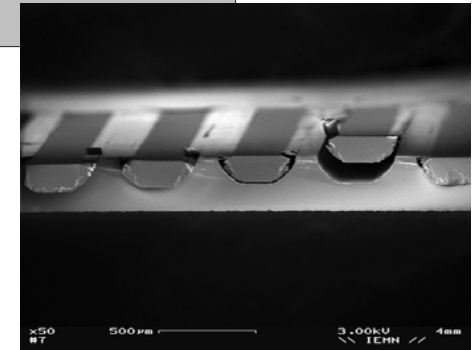
Une Pt_{1000} intégrée au cœur du capteur permet de connaître sa température de surface

Gravure électrochimique
HF(27%) / Ethanol (35 %) / Eau (38%)
Densité de courant = 100 mA/cm²

Masque de résine



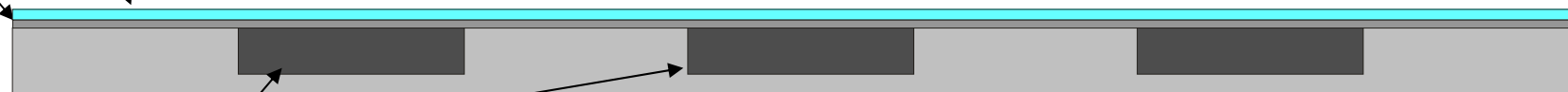
Silicium poreux, $e = 150 \mu\text{m}$
 $\lambda_{\text{POREUX}} = 2 \text{ W/m.K}$



Oxydation thermique du silicium poreux
garantie une meilleure tenue mécanique et
diminue sa conductivité thermique

Polysilicium

Si_3N_4



Silicium poreux oxydé
 $\lambda_{\text{POREUX OXYDE}} = 1.4 \text{ W/m.K}$

Implantation P Bore

10^{16} at/cm^2 $E = 20 \text{ keV}$

$\alpha = 196 \mu\text{V/K}$, $\rho = 3.1 \cdot 10^{-3} \Omega\text{cm}$

Implantation N Phosphore

10^{16} at/cm^2 $E = 100 \text{ keV}$

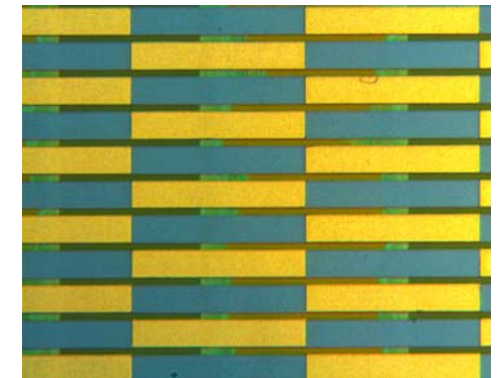
$\alpha = 154 \mu\text{V/K}$, $\rho = 1.7 \cdot 10^{-3} \Omega\text{cm}$

Si_3N_4
1000 Å

Polysilicium
5000 Å

Silicium poreux oxydé

$\lambda_{\text{POREUX OXYDE}} = 1.4 \text{ W/m.K}$



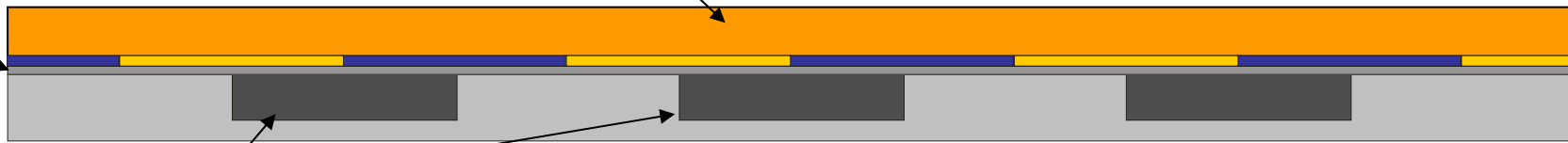
Pouvoir thermoélectrique élevé : $(\alpha_{\text{Phosphore/Bore}})_{293 \text{ K}} = 350.8 \mu\text{V/K}$

Grand nombre de thermocouples associés en série ($n = 500$)

Dépôt à la tournette de polyimide
 $e = 10 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.2 \text{ W/m.K}$

Si_3N_4
 $\lambda = 20 \text{ W/m.K}$

Polysilicium
dopé

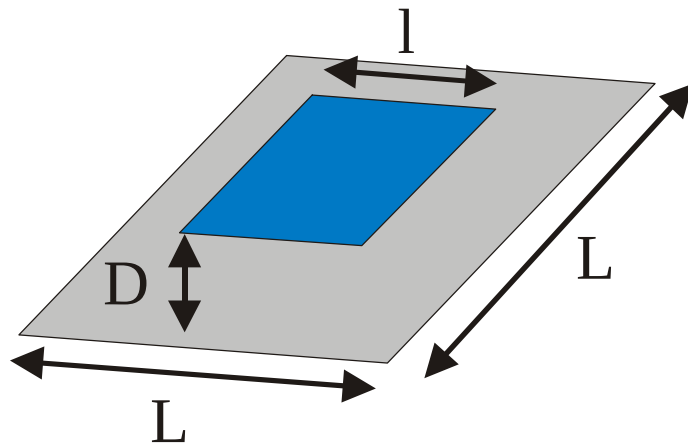


Silicium poreux oxydé
 $\lambda_{\text{POREUX OXYDE}} = 1.4 \text{ W/m.K}$

L'absorptivité élevée du Polyimide ($a = 0.9$) en fait un très bon absorbant Infrarouge

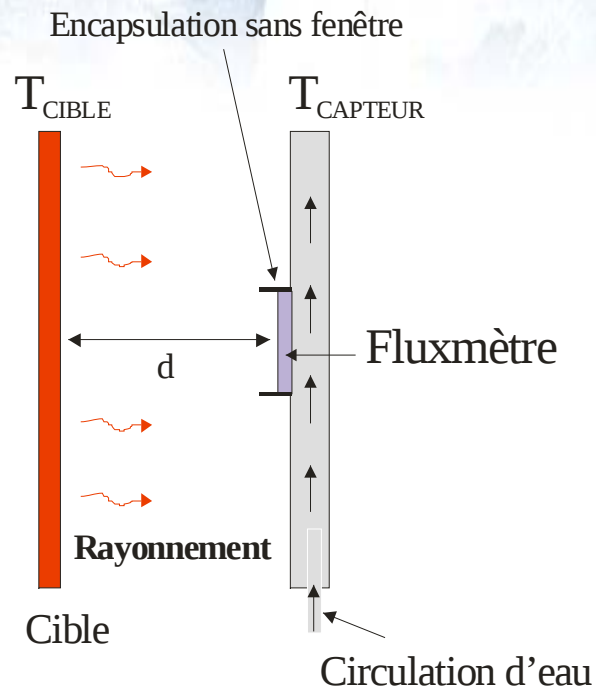
Facteur de forme entre une source de dimensions importantes et le capteur

Une équation analytique approchée permettant d'évaluer les échanges radiatifs avec une précision de 5% est :

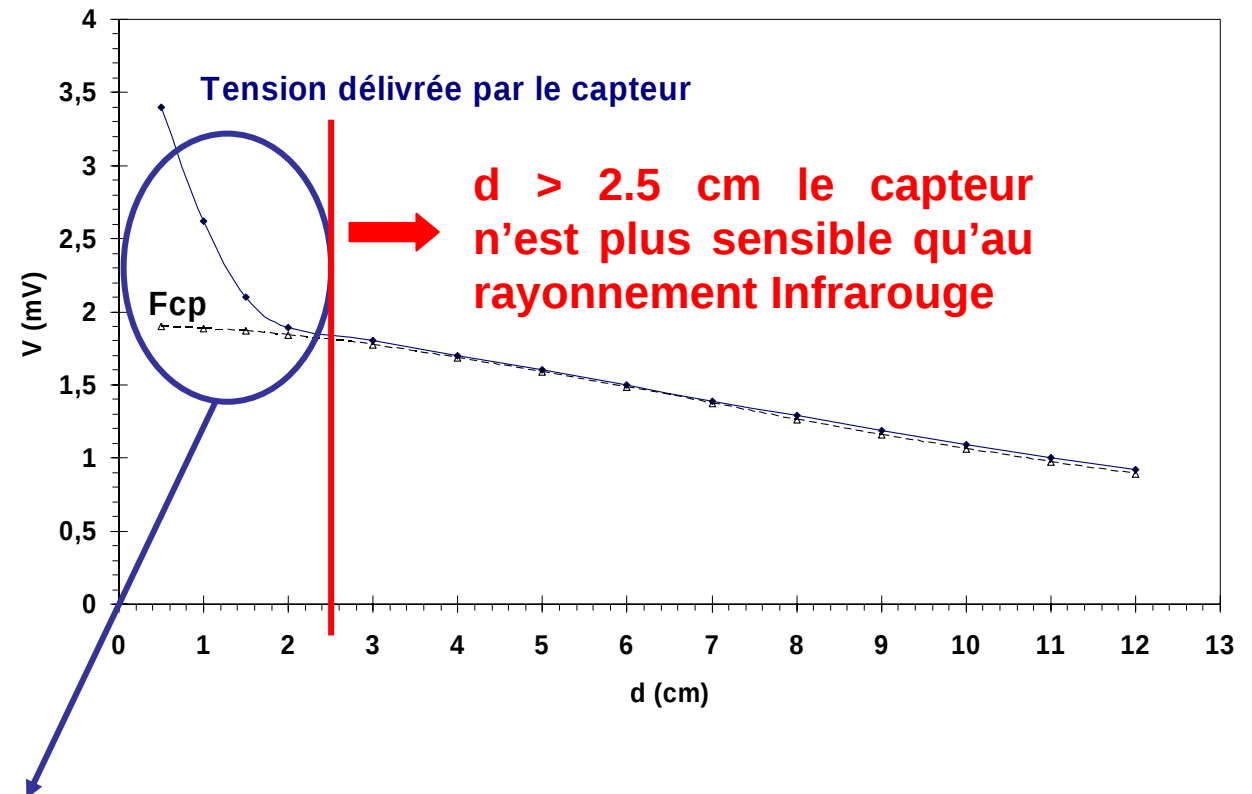


$$F_{cp} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{\text{Surface}_{\text{cible}}} \cdot D^2}$$

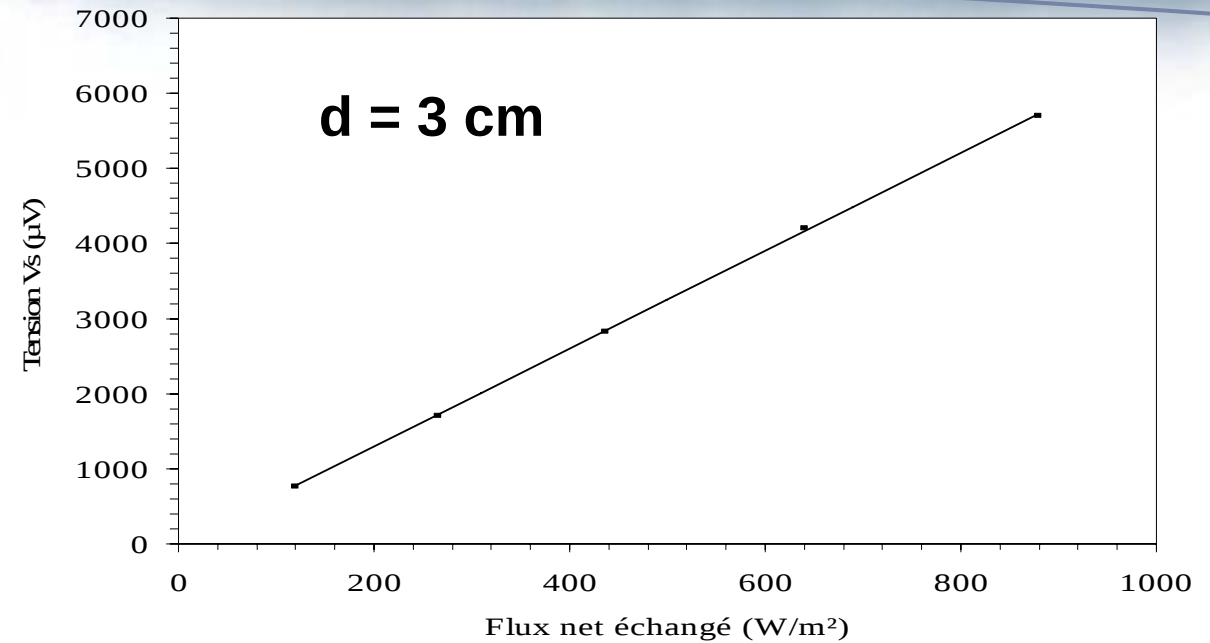
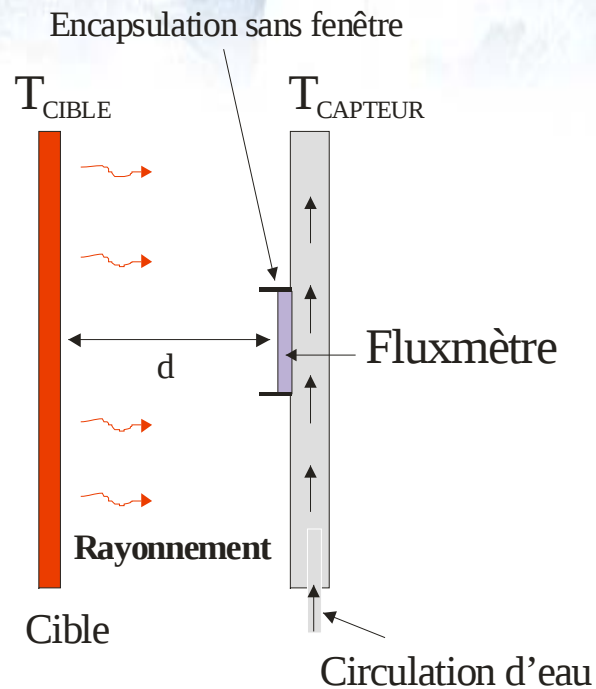
Expression valide si $l \leq L/5$



Tension délivrée par le capteur lorsque celui-ci est disposée face à une cible d'émissivité proche de 1 élevée à 70°C
 (Surface cible 20x 20 cm² > Surface capteur 0.5 x 0.5 cm²)



Ecart est lié à la sensibilité de l'air



Le flux radiatif net (W/m^2) échangé entre la cible et le capteur

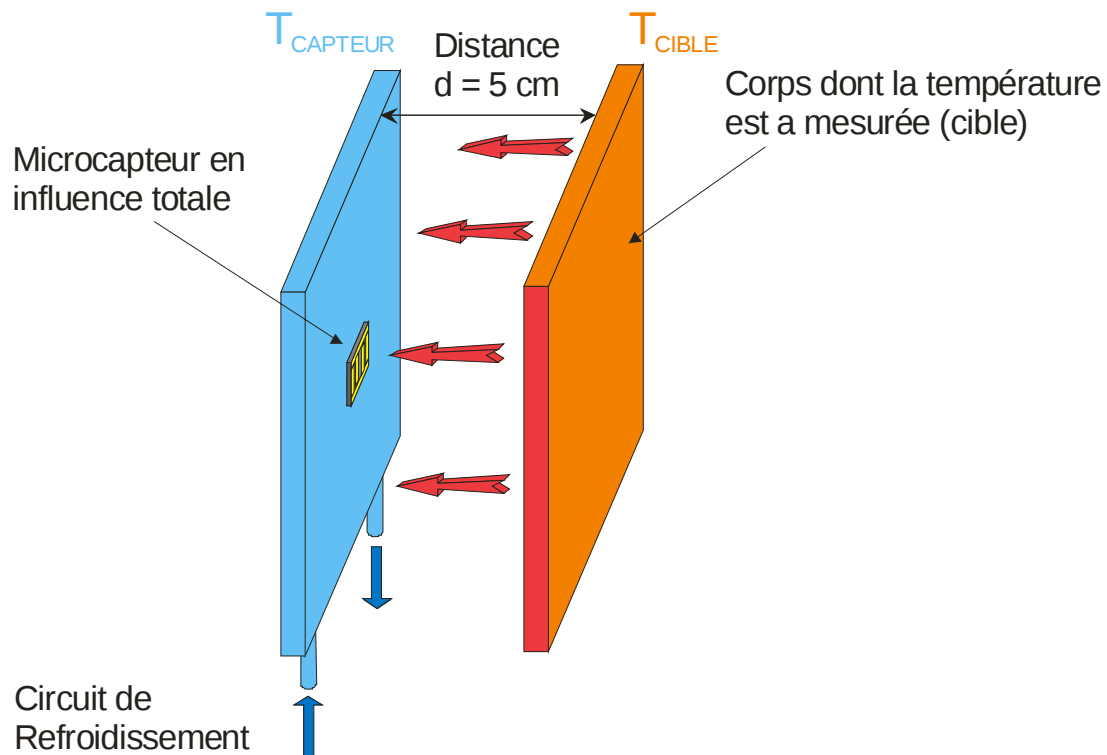
$$\varphi = 0.95\sigma_0(T_{cible}^4 - T_{capteur}^4)$$

$\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$, constante de BOLTZMAN

Sensibilité du capteur $S_E = \left(\frac{\partial V}{\partial \varphi} \right)_{T_{CAPTEUR}=cste}$

$$S_E = 6.5 \mu V/(W/m^2) \text{ ou } 260 mV/W$$

Principe de la mesure sans contact de la température d'un corps par détection du rayonnement infrarouge



Capteur Infrarouge industriel



- ✓ Le capteur doit rester propre
- ✓ Sa température de fonctionnement peut être inférieure à la température de la cible

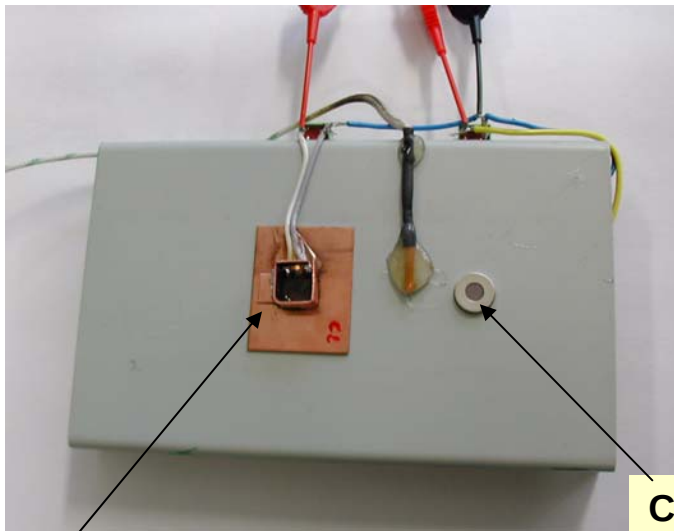
$$\phi_{net} = \sigma \cdot S \cdot \varepsilon_{Cible} \cdot (T_{Cible}^4 - T_{Capteur}^4)$$

Loi de Stefan Boltzmann

Mesure de température sans contact en milieu sale

Les capteurs infrarouge usuels deviennent inopérant lorsque la fenêtre de protection est sale

Validation expérimentale : les deux capteurs sont disposés face à une cible à 100 °C

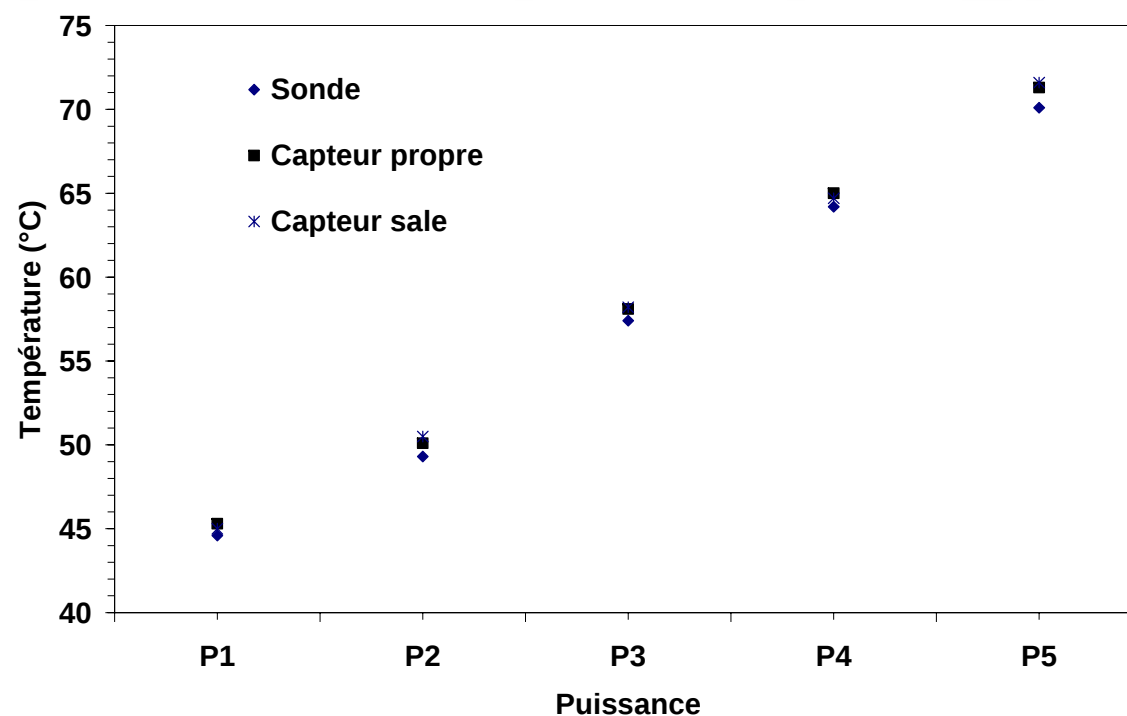
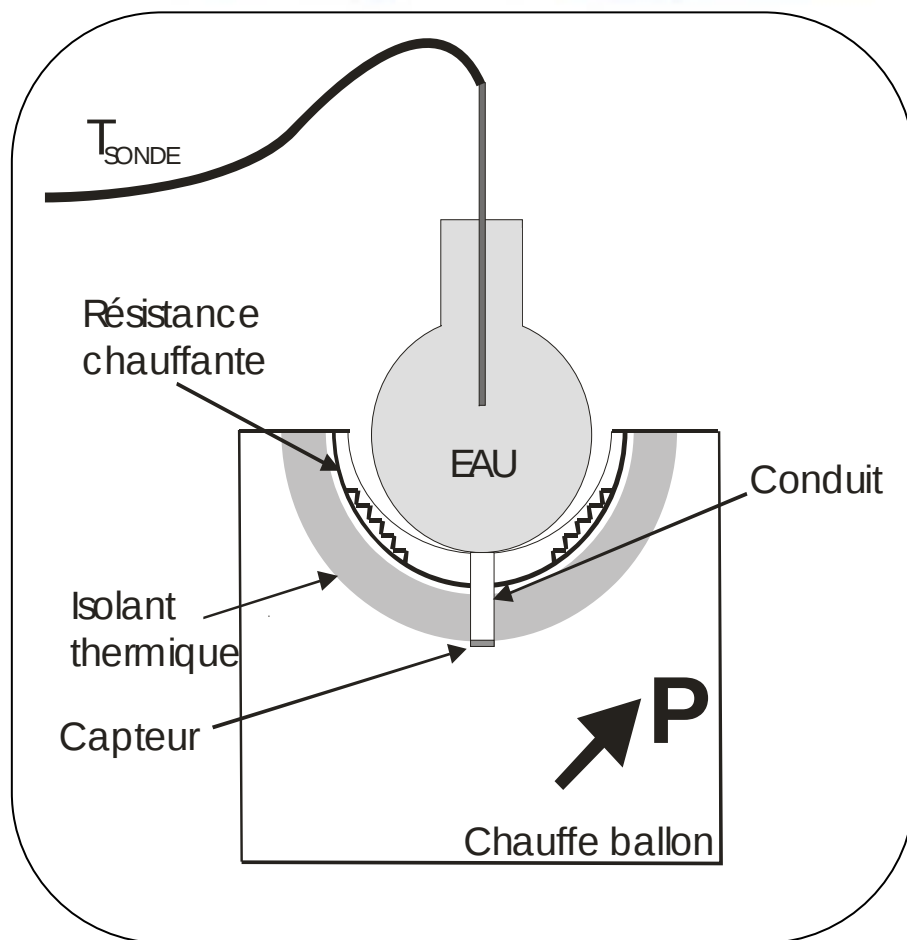


Capteur industriel

Température mesurée	Capteur IEMN	Capteur industriel
Avant salissure	97 °C	99 °C
Après salissure (graisse + graphite)	99 °C	38 °C
Erreur	< 5%	> 60%

✓ Le Microcapteur de flux thermique IEMN est peu perturbé par la salissure car il fonctionne sans fenêtre, Il est cependant un peu sensible à la convection.

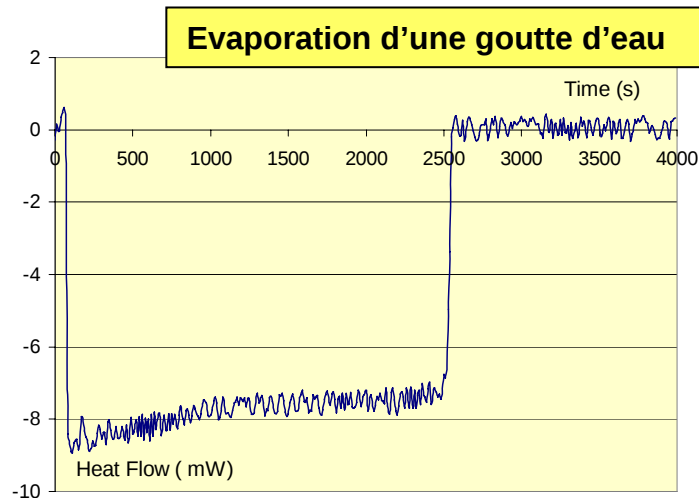
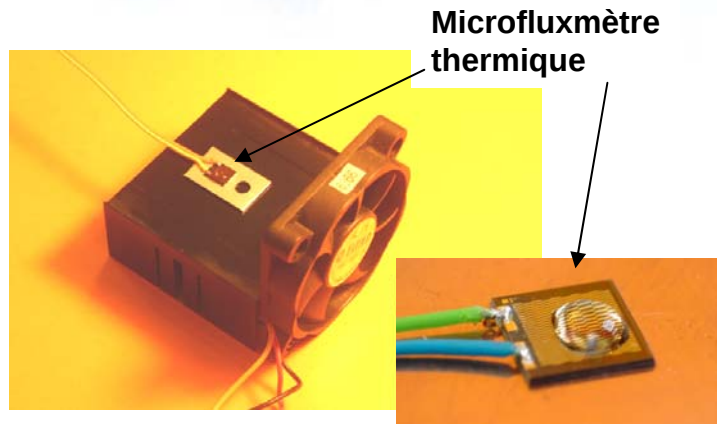
Intégration du capteur dans un chauffe ballon



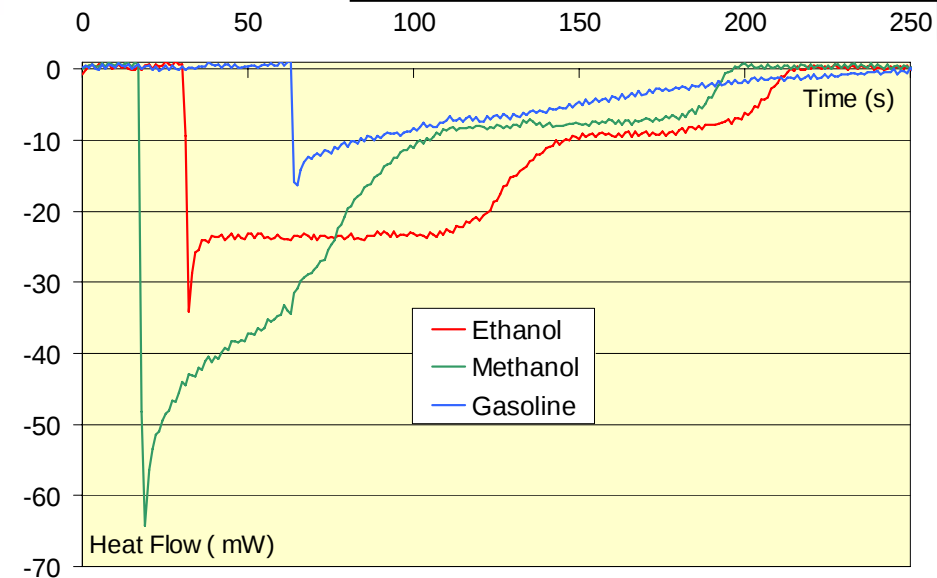
La température mesurée est comparée à celle indiquée par la sonde. L'écart est inférieur à 2 % (1°C) même quand le capteur est Sali.

Application

Détection et identification de liquides



Evaporation de différents liquides



✓ Le microcapteur mesure le flux de chaleur latente induit par l'évaporation du liquide.

✓ La présence d'eau dans le liquide provoque l'apparition d'un palier (Ethanol)

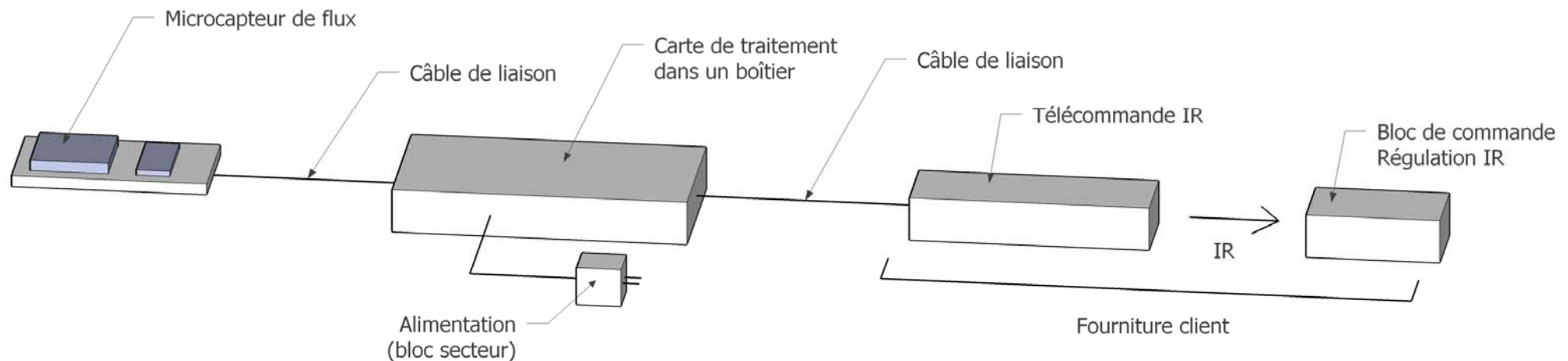
Le groupe Zehnder est représenté à l'échelle mondiale et leader en Europe sur le marché de la fabrication de radiateurs sur mesure.



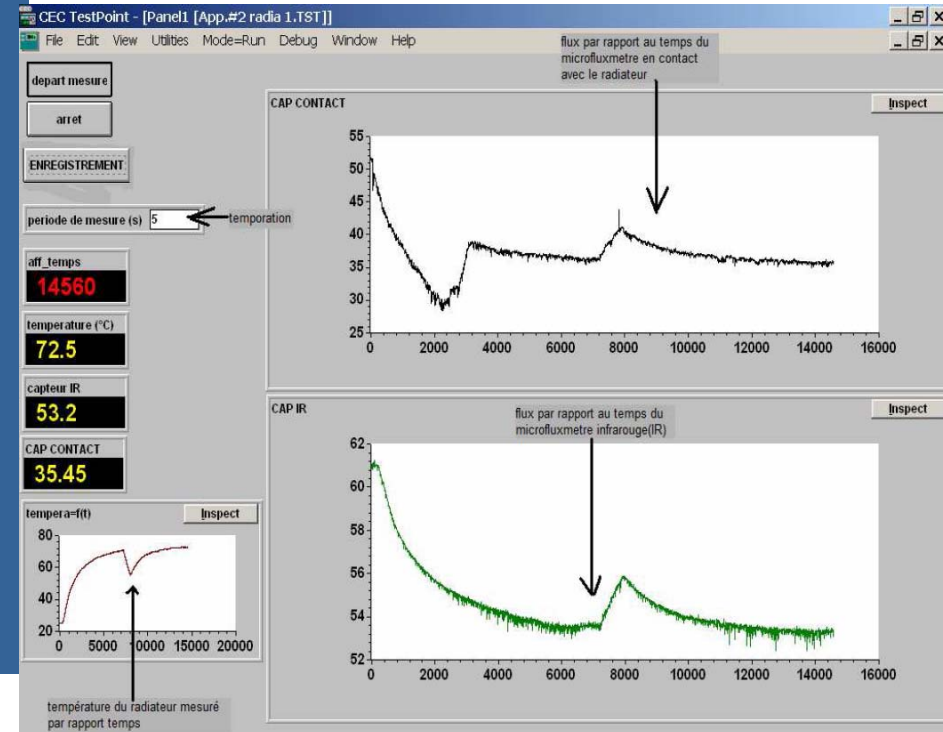
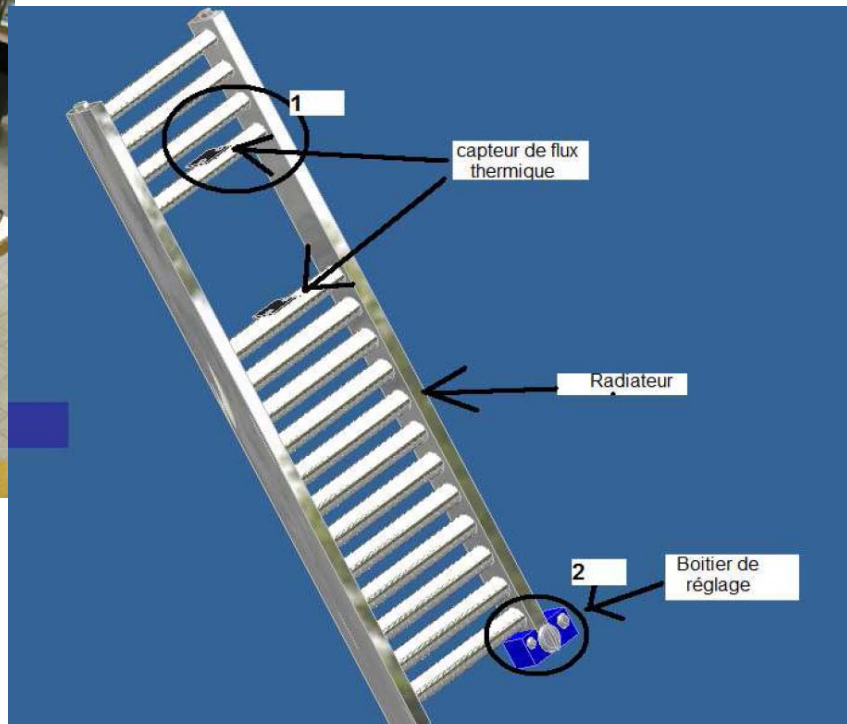
Etude de faisabilité d'un détecteur de linge humide pour sèche serviette de salle de bains

Projet de développement d'une carte électronique destinée à assurer le contrôle d'un sèche-serviettes avec intégration du fluxmètre

- Etude de faisabilité a démontré qu'il était envisageable d'utiliser le capteur de flux thermique développé pour détecter la présence d'un linge humide et assurer le pilotage du sèche-serviettes pour l'obtention d'un séchage satisfaisant.
- Etude fluxmétrique des énergies absorbées par une serviette humide
- Réalisation d'un prototype assurant le contrôle de la fonction séchage du sèche-serviettes.

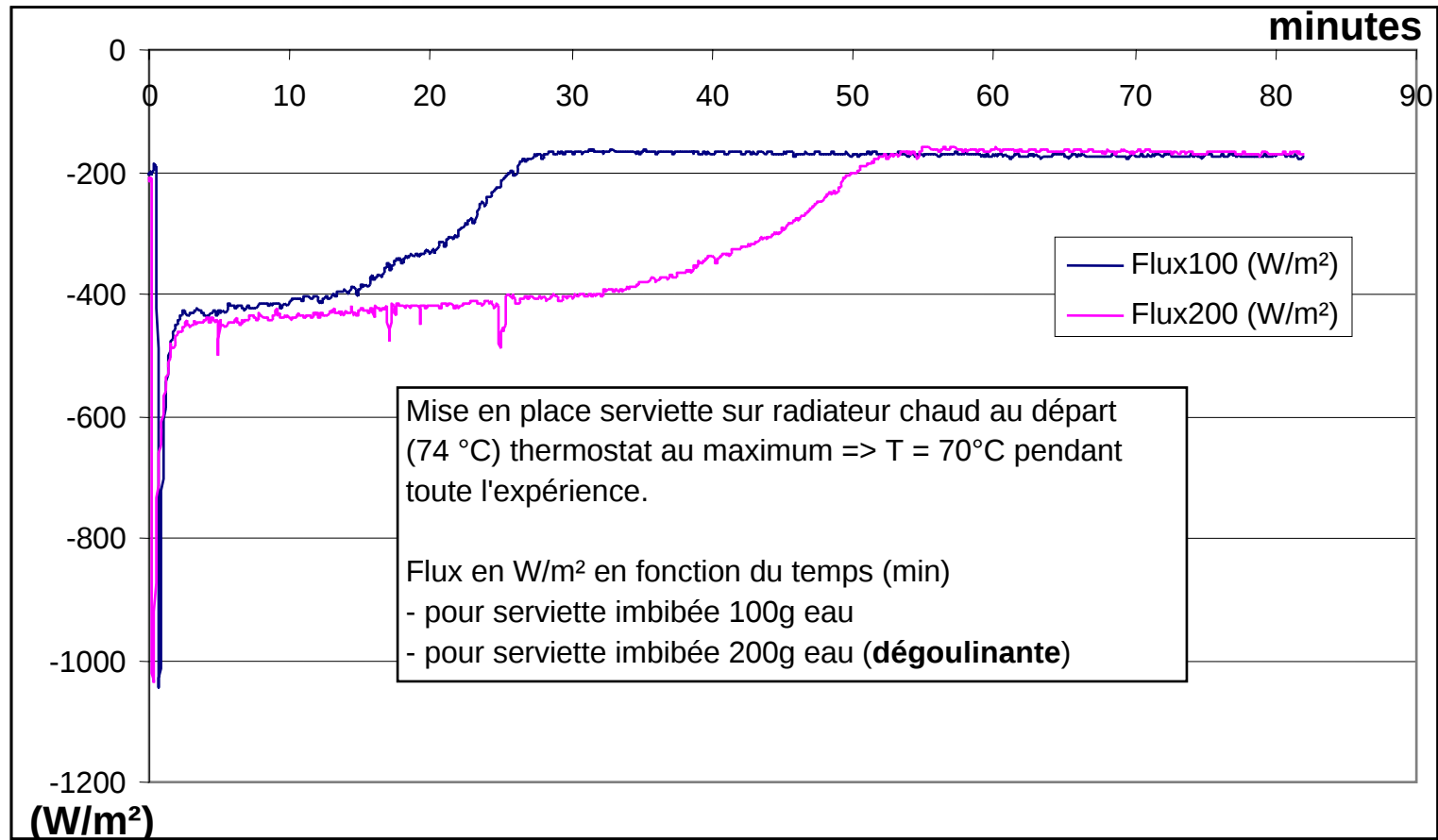


L'étude de faisabilité a été effectuée par M. SEYE dans le cadre de son stage de fin d'étude (cycle IUT).



Premier prototype avec intégration du fluxmètre par M. JOORIS technicien (ancien étudiant IUT A) dans le cadre d'un contrat partenarial avec Zehnder.

Exemples de réponses délivrées par le fluxmètre



Relevés sur sèche serviette Zehnder

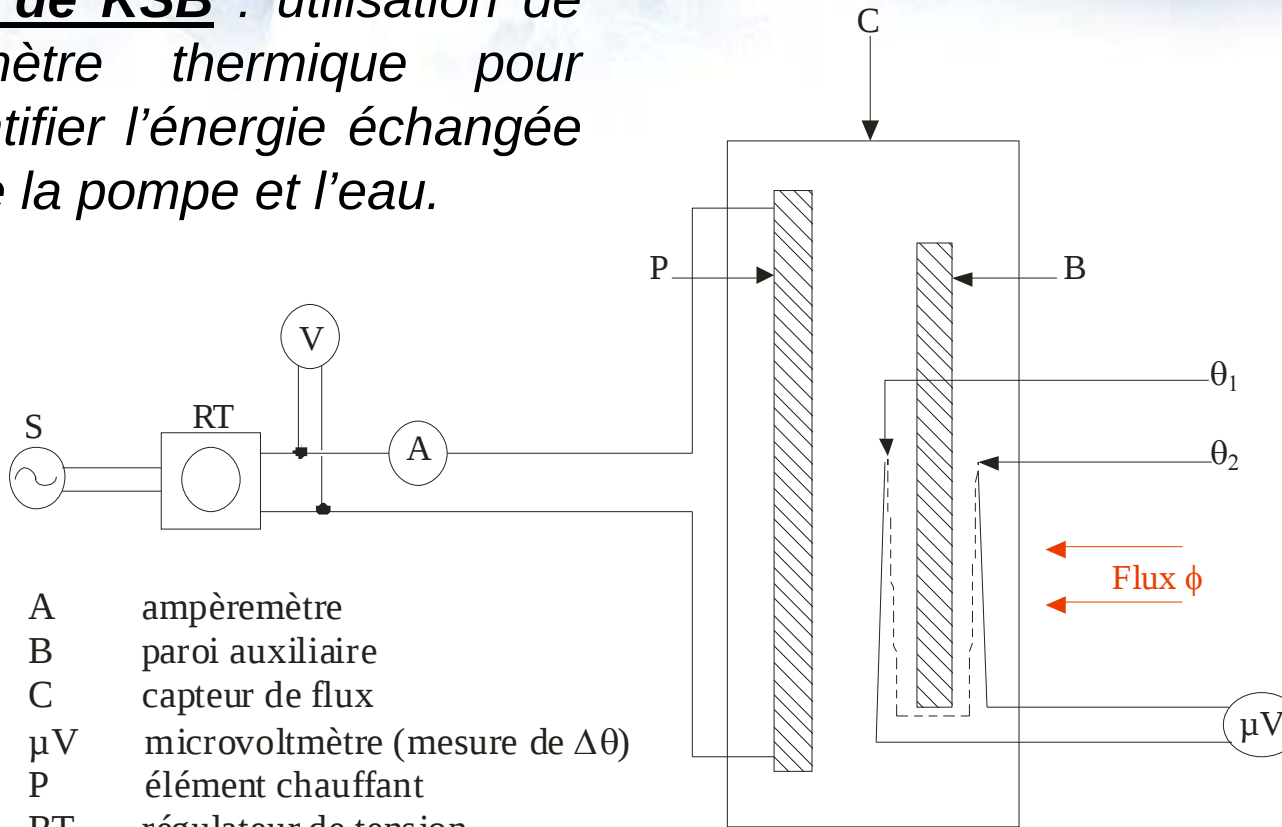
Avec un chiffre d'affaires d'environ deux milliards d'euros, le Groupe KSB compte parmi les plus grands constructeurs de pompes



*Pompe de relevage
à coût élevé*

Problématique qui nous intéresse est celle qui concerne les pompes immergées, avec la nécessité de savoir si la pompe est dans l'eau (éviter fonctionnement à vide - risque d'échauffement et destruction).

Idée de KSB : utilisation de fluxmètre thermique pour quantifier l'énergie échangée entre la pompe et l'eau.



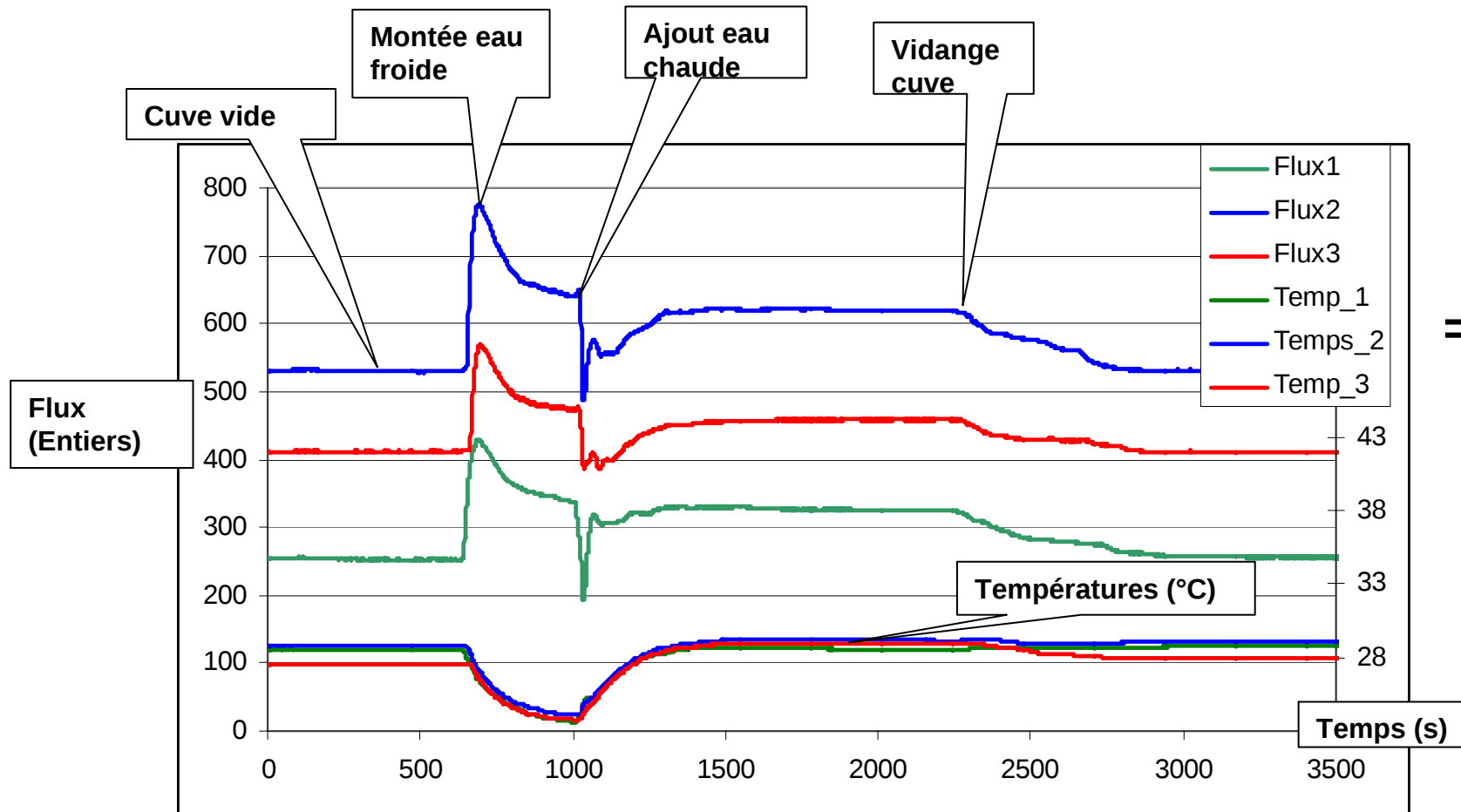
A	ampèremètre
B	paroi auxiliaire
C	capteur de flux
μV	microvoltmètre (mesure de $\Delta\theta$)
P	élément chauffant
RT	régulateur de tension
S	source
V	voltmètre
Φ	flux reçu
θ_1, θ_2	température des soudures des couples thermoélectriques

Le fluxmètre doit être :

- Rapide,
- Peu perturbant ($R_{th} \ll$),
- Résister à l'eau,
- Faible coût,
- Non intrusif...

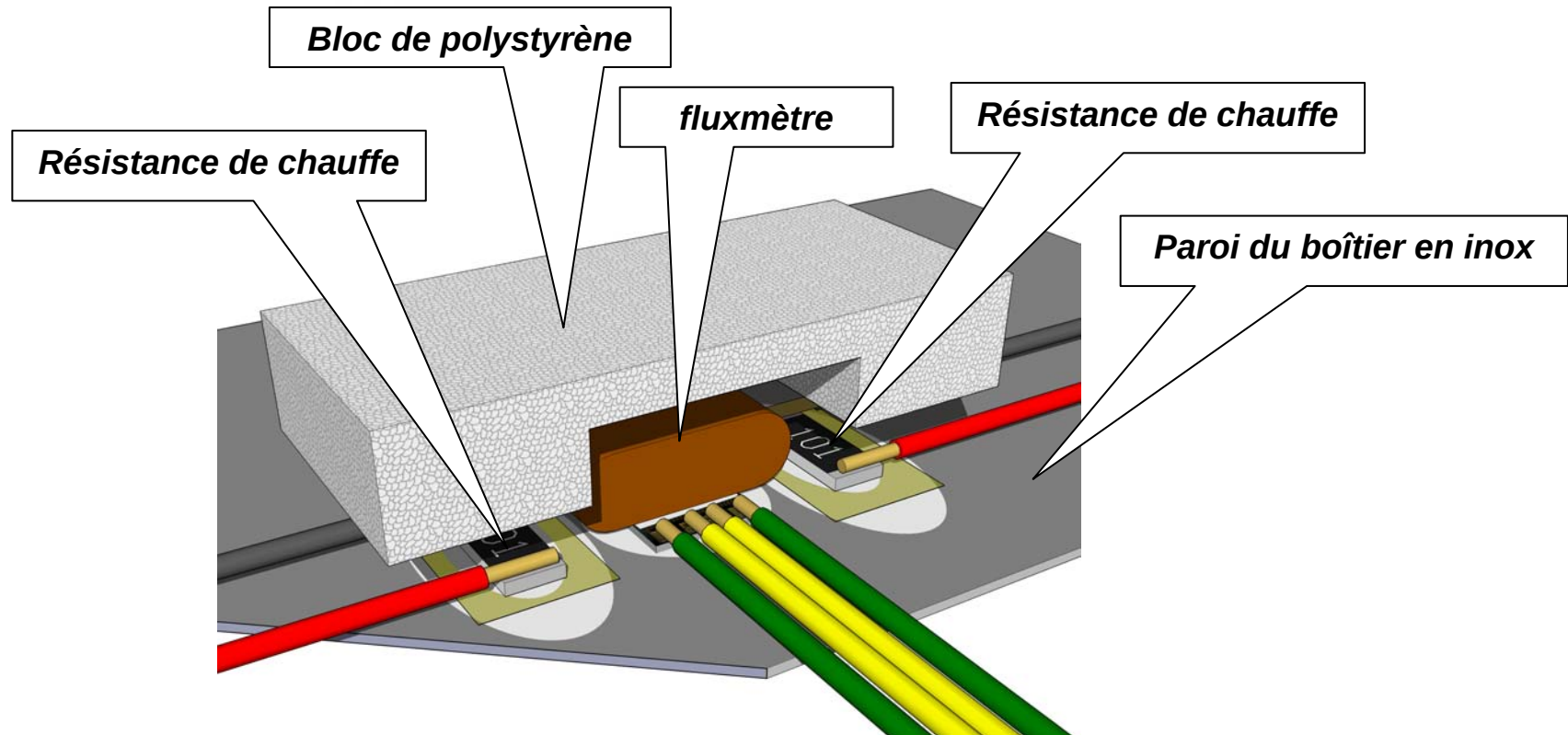
Fluxmètre à méthode de zéro

Premiers essais : utilisation de 3 fluxmètres disposés dans le carter de la pompe immergée (fluxmètres intégrant des sondes de températures Pt_{1000})



=> *Méthode statique*

Méthode dynamique

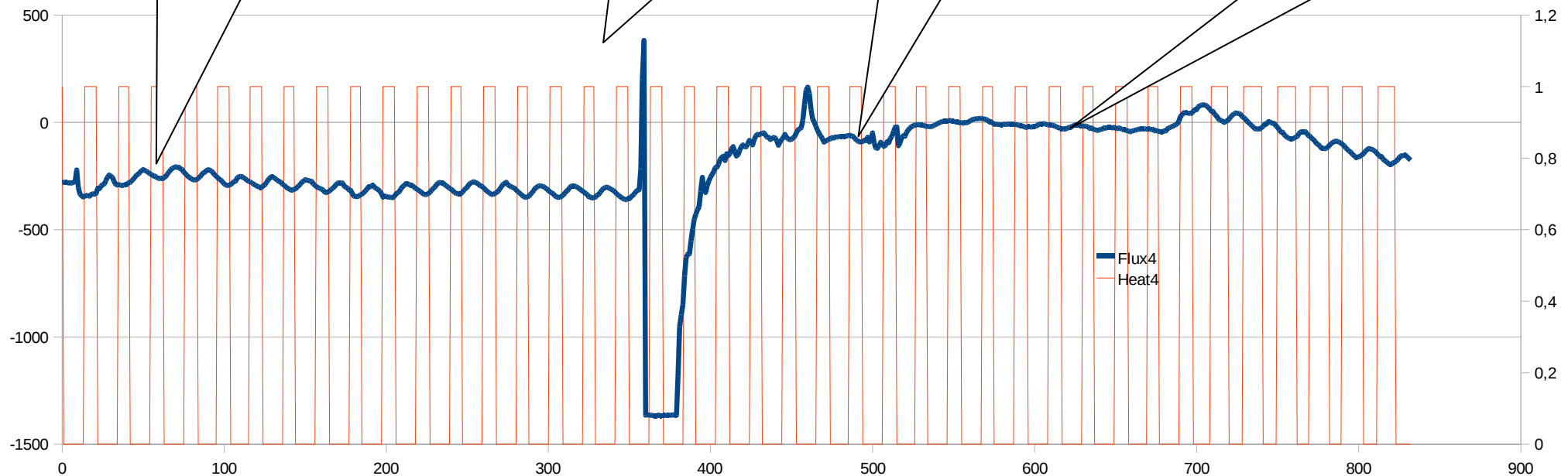


Le détecteur est hors de l'eau et le signal délivré par le fluxmètre fait apparaître une oscillation à la fréquence du signal de chauffe

Pompe mise en route et remplissage de la cuve. Il apparaît alors un fort transitoire de flux thermique (>0 et <0) lorsque l'eau atteint le capteur. (refroidissement brusque de la plaque)

Signal de flux se stabilise (fluctuations aléatoires dus aux mouvements d'eau dans la cuve (mouvements de convection))

Détecteur immergé, le signal de flux périodique est devenu extrêmement faible



Les résistances chauffantes CMS sont alimentées simultanément par un signal carré de période 20s et de puissance 1,5 W

Avantages du fluxmètre :

- *Technologie Silicium compatible CMOS : faible résistance thermique (perturbations dues à sa présence sont faibles), bonne précision de mesure, faible coût de fabrication),*

Le capteur permet la mesure :

- *Température sans contact (même dans un environnement sale)*
- *Température avec contact (résistance platine intégrée)*
- *Flux thermique échangé entre deux corps*

Partenariats Industriels

- *Etude de l'industrialisation KSB et Zehnder en cours*
- *Étude de transfert technologique (en cours avec le LETI)*
- *Nouveau projet Opticook – SEB (avec le LAGIS – lien IUT A)*