

# Distribution spatiale de flux dans la zone focale d'un four solaire

-

## Moyen d'étalonnage de fluxmètres

Emmanuel Scheer, Jean-Jacques Serra

DGA/DET/CEP/LOT/EHF

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE



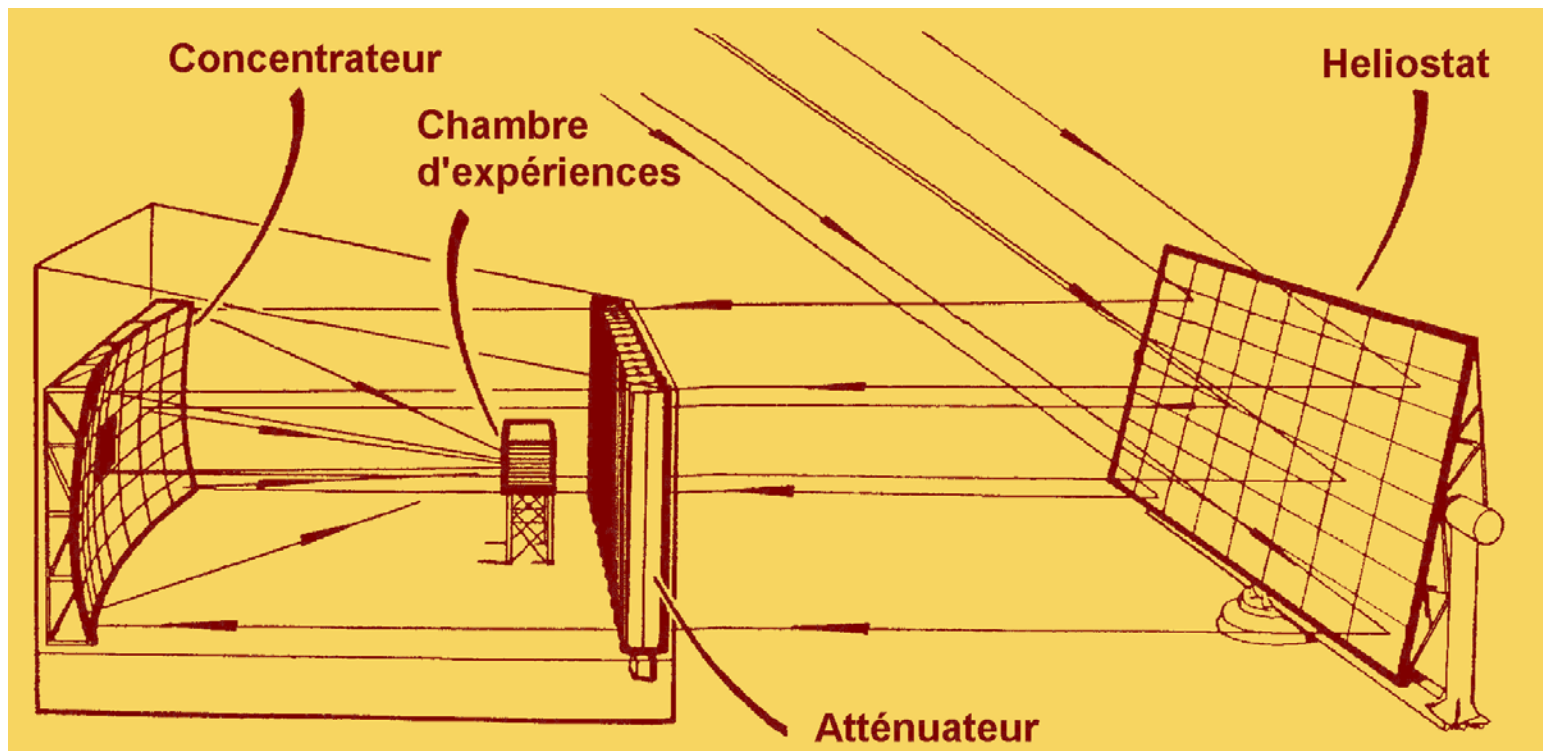
# Le four solaire DGA



MINISTÈRE DE LA DÉFENSE



Héliostat : réflecteur plan de 17.6×14 m (580 miroirs élémentaires)  
Réflexion dans une direction Nord-Sud horizontale  
avec une précision meilleure que 1' d'arc



Concentrateur : Miroir composite type Davies-Cotton (396 facettes sphériques)  
Dimensions 10x10 m avec une distance focale de 10.75 m  
Distribution focale en cloche avec un diamètre à mi-hauteur de 10 cm.

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE





Atténuateur :

- 2 panneaux glissant verticalement et fonctionnant comme des paupières. Leur position reste fixe pendant un test ;
- 20 volets mobiles autour d'un axe vertical et fonctionnant comme un store vénitien. Leur rotation permet de moduler continûment le flux atteignant le foyer.

Comment ça marche ?

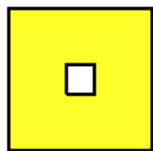
## Eclairement reçu au foyer du four solaire

L'éclairement  $\Phi$  reçu au foyer du four solaire est donné par :

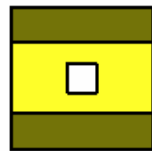
$$\Phi = \phi_s C$$

- $\phi_s$  est l'éclairement solaire direct,
- $C$  est le facteur de concentration énergétique.

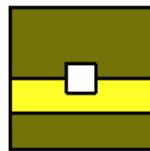
### ◆ Paupières composées de 2 panneaux (haut et bas) limitant la surface éclairée



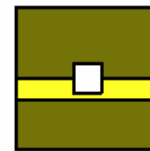
Entier



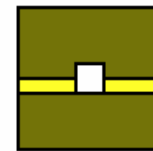
50%



25%



15%



10%

## ◆ Paramètres intermédiaires

Pour chacune des positions des panneaux/paupières (indice p) on détermine :

- un facteur de concentration maximal  $C_{mp}$   $\Leftrightarrow$  ouverture maximale des volets,
- un éclairement maximal accessible  $\Phi_{Mp}$   $\Leftrightarrow$  ouverture maximale des volets et éclairement solaire maximal  $\phi_{Ms}$ , fixé à 1100 W/m<sup>2</sup> par convention

Avec ces notations, on peut définir :  $\Phi_{Mp} = \phi_{Ms} C_{mp}$

L'éclairement  $\Phi$  reçu au foyer est toujours inférieur à la valeur maximale  $\Phi_{Mp}$

et on définit A comme étant le rapport :

$$A = \Phi / \Phi_{Mp}$$

L'éclairement solaire  $\phi_s$  est toujours inférieur à la valeur maximale  $\phi_{Ms}$

et on définit G (correction pyrhéliométrique) :

$$G = \phi_{Ms} / \phi_s$$

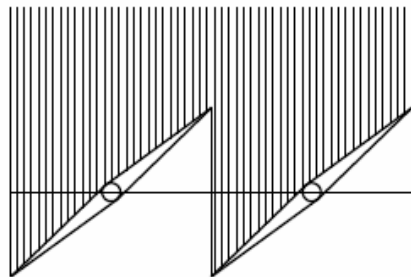
Des relations précédentes, on déduit :  $C / C_{mp} = AG$

## ◆ Relation entre Concentration et angle de rotation des volets

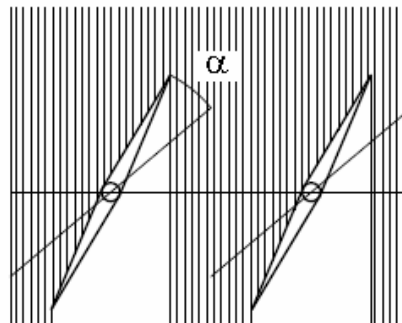
L'éclairement reçu au foyer est proportionnel à la projection frontale de la partie éclairée du concentrateur, ce qui se traduit par :

$$C / C_{mp} = S / S_{mp}$$

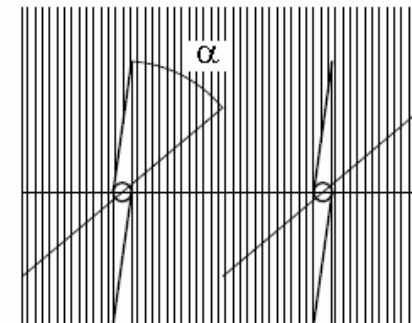
- S est la projection de la zone éclairée à un instant donné.
- $S_{mp}$  est la projection de la zone éclairée pour l'ouverture maximale des volets.



Fermé



50% ouvert



100% ouvert

$$\frac{C}{C_{mp}} = \frac{\sin(50) - \sin(50 - \alpha)}{\sin(50) - \sin(4)}$$

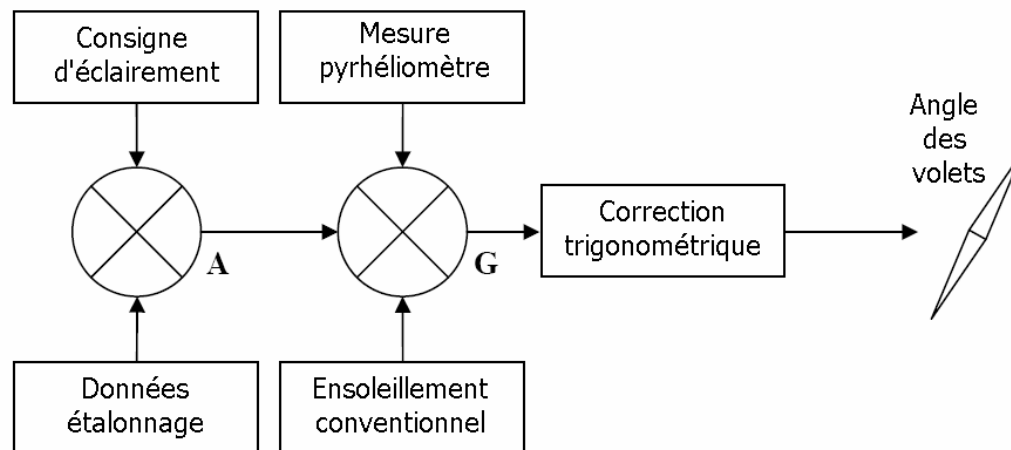
$$\alpha = 50 - \text{asn}(0.766 - 0.6963C / C_{mp})$$

## ◆ Principe de l'asservissement de l'atténuateur

$$\alpha = 50 - \text{asn}(0.766 - 0.6963AG)$$

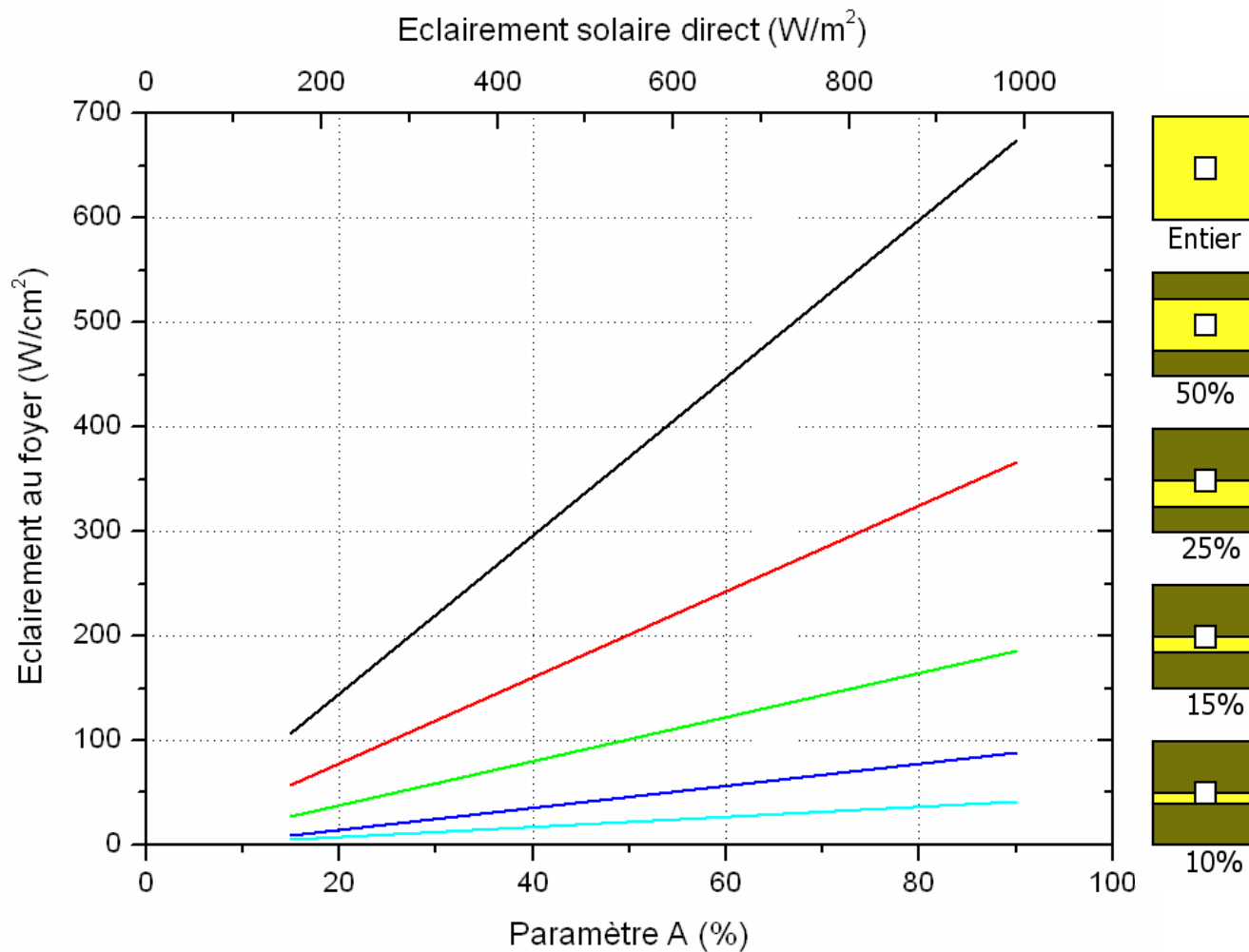
$G = \phi_{Ms} / \phi_s$   $\Rightarrow \phi_s$  est mesuré à l'aide d'un pyréliomètre

$A = \Phi / \Phi_{Mp}$   $\Rightarrow \Phi$  et A sont proportionnels





◆ Données nécessaires à l'asservissement de l'atténuateur



# Etalonnage de l'installation

## ① Mesure de la distribution spatiale de l'énergie

Cible plane parfaitement blanche et diffusante (plaque Al, 20 mm d'épaisseur, peinture Spectraflect).  
Caméra CCD placée dans l'axe du concentrateur qui vise la cible

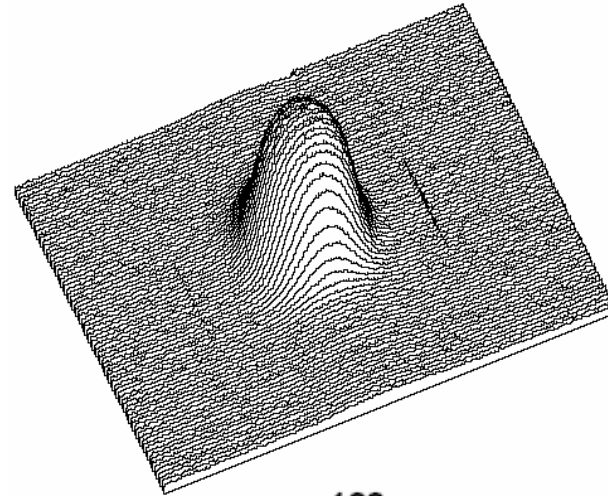
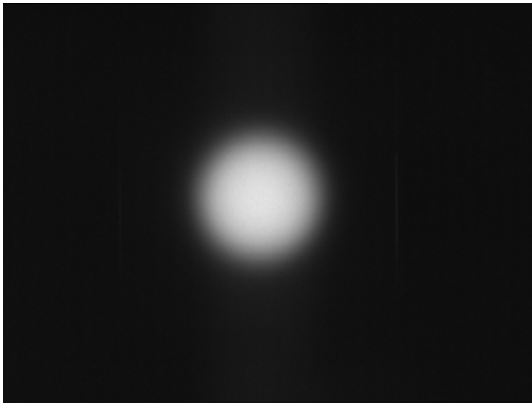
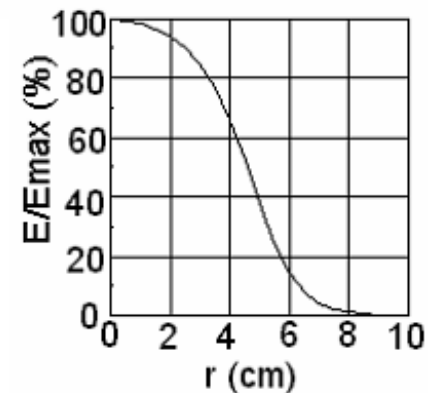


Image enregistrée numériquement  
pour chaque ouverture de porte et plusieurs positions de volets

- ⇒ Vérification que la distribution
- est indépendante de ces paramètres
  - mesure 10 cm de diamètre à mi-hauteur



MINISTÈRE DE LA DÉFENSE



# Etalonnage de l'installation

## 2 Mesure du flux incident sur une surface donnée

Calorimètre à circulation d'eau :

$$\Phi = \frac{D_m C_p \Delta T}{\alpha_c A}$$

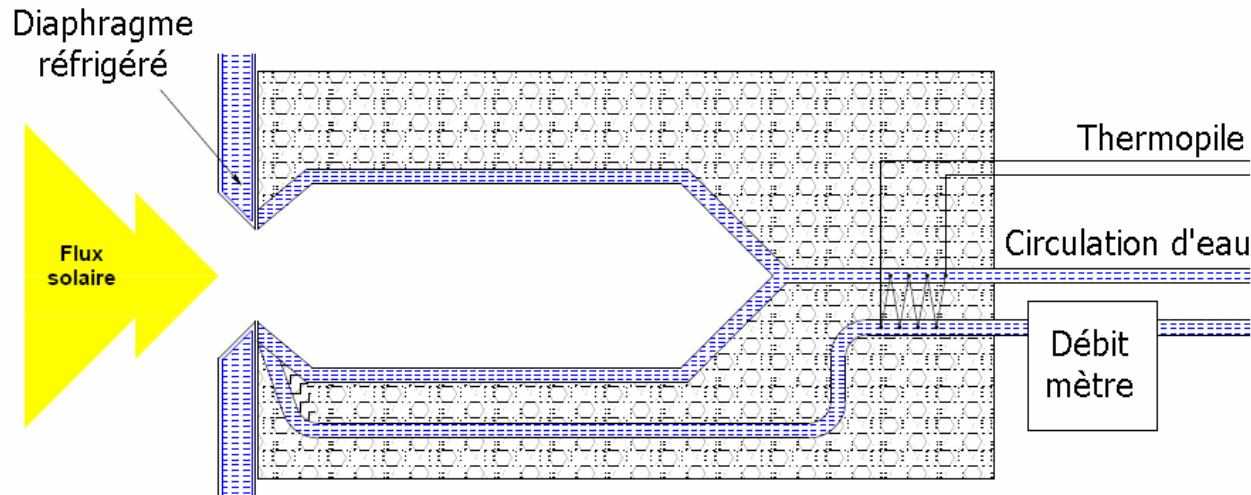
$D_m$  : débit massique

$C_p$  : chaleur spécifique de l'eau

$\Delta T$  : élévation de température de l'eau

$\alpha_c$  : absorptivité de la cavité

$A$  : aire de l'orifice d'entrée



Thermopile : 5 paires de thermocouples type E montés en série

Débitmètre : massique (effet Coriolis)

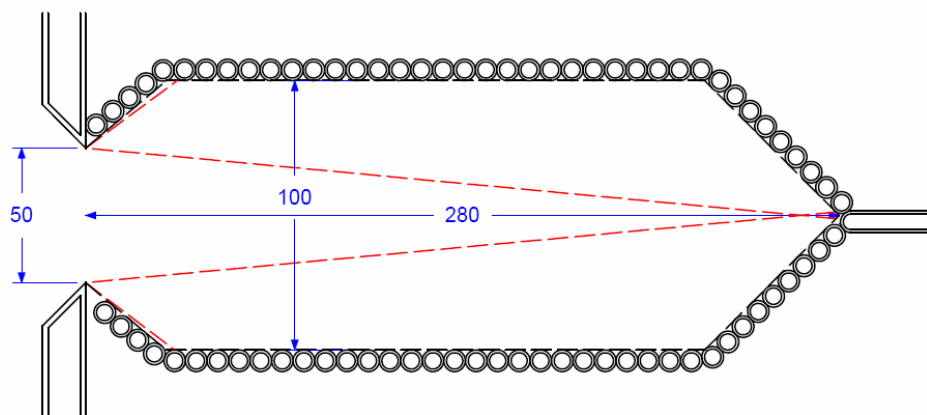
valeurs  $\leq 50$  kg/h : Coriflow M54

valeurs  $\geq 50$  kg/h : Promass DN8

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE



## Calorimètre à circulation d'eau



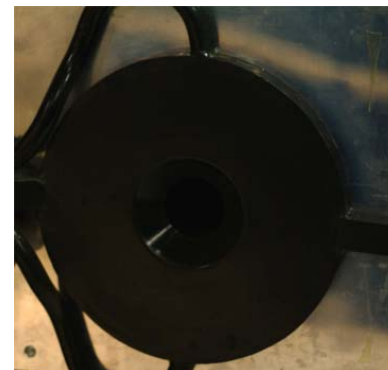
Pertes thermiques :

non mesurables pour  $\Delta T \leq 20^\circ\text{C}$

Absorptivité calculée avec la relation de Gouffé

si  $\alpha_{\text{interne}} = 0.9 \Rightarrow \alpha_c = 0.9989$

or  $\alpha_{\text{peinture}} > 0.9$  et intérieur rainuré



MINISTÈRE DE LA DÉFENSE



# Etalonnage de l'installation

## ③ Evaluation des incertitudes

- **sur la valeur du rayonnement solaire incident**

- mesure pyrhéliométrique  $\leq 1\%$  quand  $\phi_s \geq 850 \text{ W/m}^2$
- réflexion sur l'héliostat : pas significatif dans une plage de 3 heures en été à 4 heures en hiver autour de midi solaire.

- **sur le positionnement des masques interceptant le rayonnement**

- positionnement des panneaux/paupières  $\leq 2\text{mm}$  soit  $0.2\%$  ( $S=1 \times 10\text{m}$ ) à  $0.02\%$  ( $S=10 \times 10\text{m}$ )
- positionnement des volets  $\leq 0.3\%$

- **sur le centrage de la tache focale**

- suivi de l'héliostat  $\leq 5 \text{ mm}$  soit  $0.25\%$

- **liées au dispositif de mesure**

- pertes thermiques/absorptivité/qualité du diaphragme : pas significatif

- mesure de débit : Coriflow M54 :  $0.20\%$  entre  $2.5 \text{ kg/h}$  et  $50 \text{ kg/h}$

Promass DN8 : de  $0.16\%$  à  $50 \text{ kg/h}$  jusqu'à  $0.115\%$  à  $200 \text{ kg/h}$

- mesure de  $\Delta T \leq 0.53\%$  (10 thermocouples)

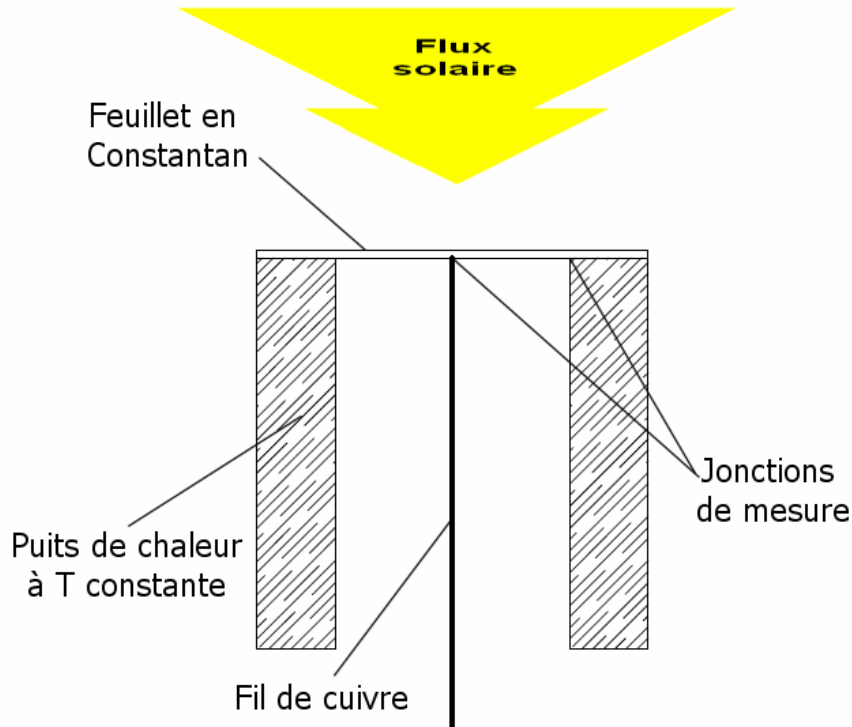
# Etalonnage de fluxmètres

## ① Fluxmètre type Gardon

Élévation de température au centre du disque : 
$$\Delta T = \frac{\alpha R^2}{4ke} \Phi$$

R : rayon  
 $\alpha$  : absorptivité  
k : conductivité  
e : épaisseur

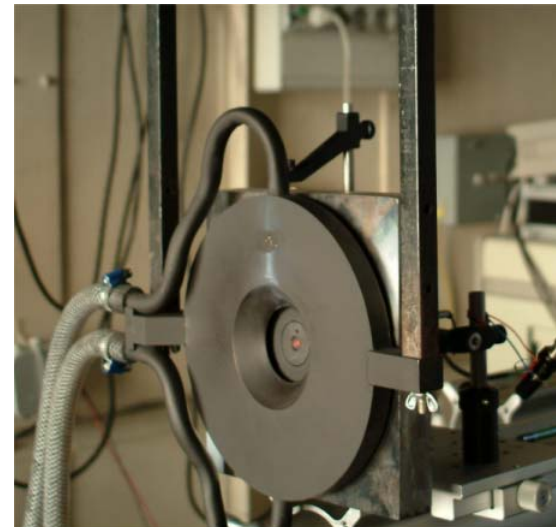
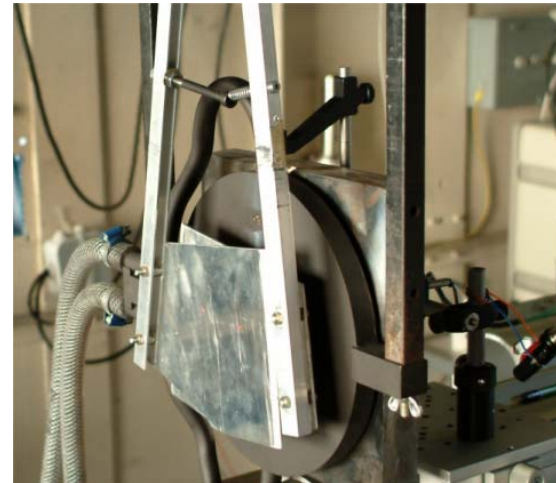
} du disque



# Etalonnage de fluxmètres

## ② Temps de réponse

Temps de montée en flux = 14 ms



# Etalonnage de fluxmètres

- Etalonnages possibles entre 5 et 600 W/cm<sup>2</sup> (50 kW/m<sup>2</sup> – 6 MW/m<sup>2</sup>)
- Evaluation du temps de réponse
- Essais de nouveaux types de fluxmètres :  
campagne commune avec CEA-CESTA et CNRS-PROMES