

RECHERCHE

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

# Identification des propriétés radiatives et des températures

Application à des protections thermiques  
pour l'industrie spatiale

*F. André, A. Delmas, C. Galizzi, J. Jay, S. Le Foll*

INSA Lyon, CETHIL UMR5008, Villeurbanne



Journée SFT

*Méthodes de mesures et de caractérisation  
des matériaux à hautes températures*

13 février 2014



# Introduction Générale

*A. Delmas*

1- Contexte scientifique  
au **C**Entre de **T**HerMIque de **L**yon



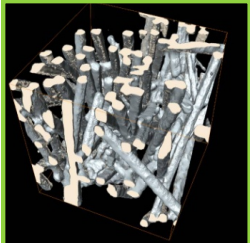
2 - Méthodes de mesure  
de températures de surfaces  
*(milieux opaques)*

3 – Identification du champ  
de température interne  
*(milieux semi-transparentes)*

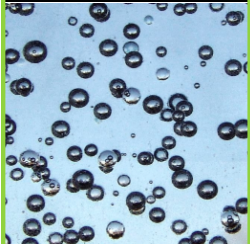
# 1- Contexte Scientifique

2 – Méthodes de mesure de température de surface

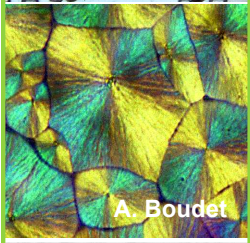
3 – Identification du champ de température interne



**A-Impact du transfert radiatif sur le transfert global dans des milieux hétérogènes à haute température**



**B-Etude du rôle des transferts thermiques sur le comportement des milieux réactifs**



## Milieux :

solides condensés ou divisés, polyphasiques, réactifs (ou non),...

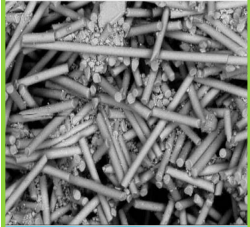
## Domaines d'application :

- Optimisation de matériaux

bâtiment, aéronautique, micro-électronique, automobile, plasturgie,...

-Optimisation de systèmes ou de procédés

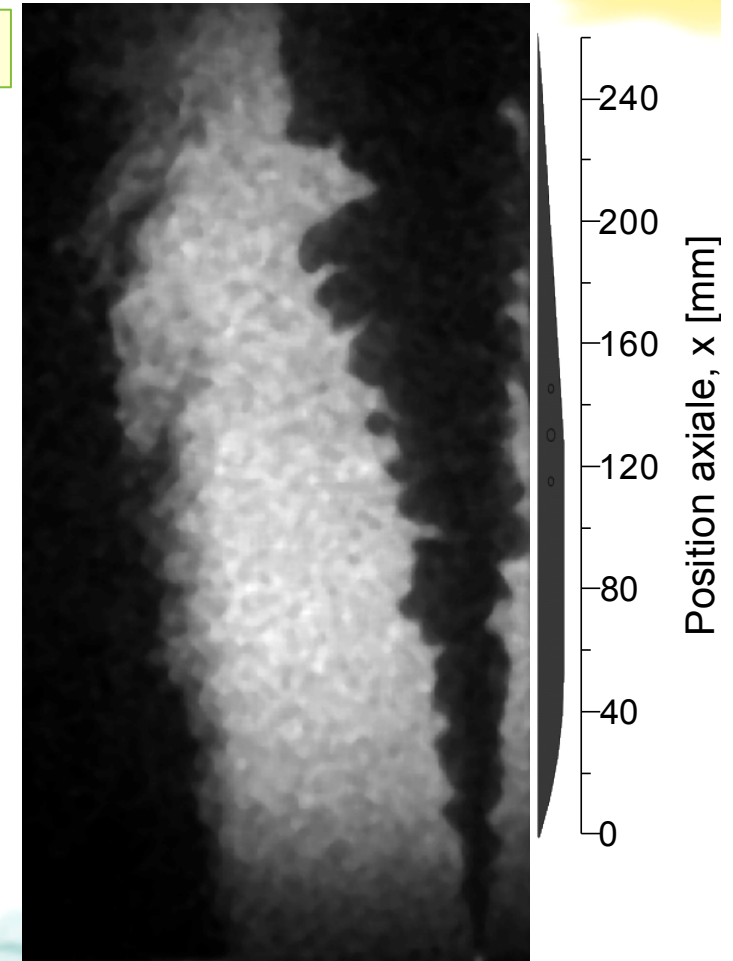
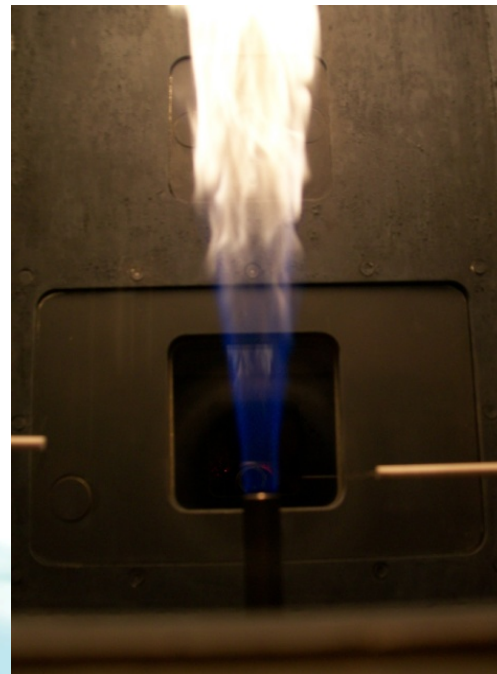
brûleurs industriels, injection, moteurs automobiles et aéronautiques, fours verriers,...



## Exemple 1 d'application à haute température

Interaction flamme-paroi

Mesure de hautes températures (paroi et lèvres du brûleur)



Banc d'essai CETHIL : Interaction flamme-paroi

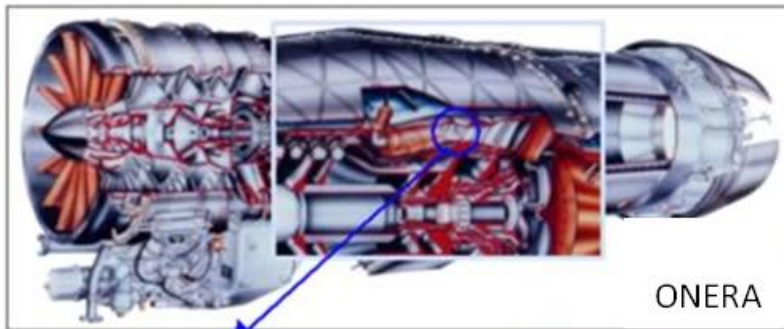
-100 -75 -50 -25 0  
Position transversale, y [mm]

## Exemple 2 d'application à haute température

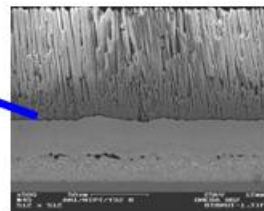
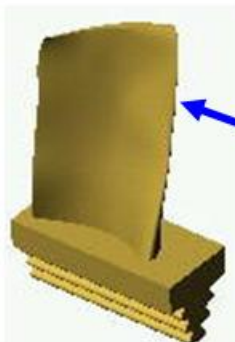
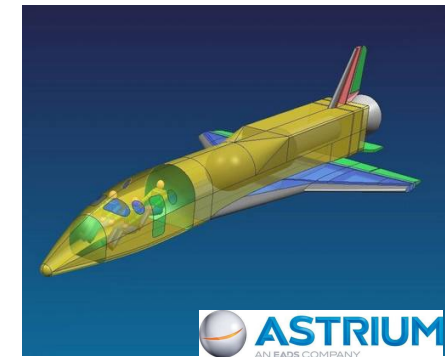
### Barrières Thermiques (TBC, TPS)

**Connaître le profil de T et les propriétés thermophysiques**

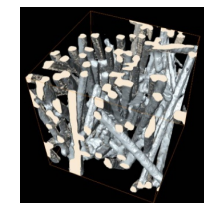
Protection thermique pour aubages aéronautiques



Protection thermique pour la réentrée atmosphérique



TBC (Thermal Barrier Coating)



TPS (Thermal Protection System)

➤ Pyrométrie au point de Christiansen (développement et mise en œuvre)

- Mise en œuvre au CETHIL : Depuis 2006
- Chercheurs impliqués : A. Delmas, L. Robin-Carillon, S. Le Foll
- Applications : mesure de  $T \sim 2000\text{K}$  matériaux céramiques et feutres carbonés

➤ Pyrométrie multi-spectrale (développement pour milieux s.t.)

- Mise en œuvre au CETHIL : Depuis 2010
- Chercheurs impliqués : A. Delmas, J. Jay, B. Quinton
- Applications : mesure de  $T \sim 2000\text{K}$  , TBC type  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$

➤ Phosphorescence

- En phase prospective au CETHIL
- Chercheurs impliqués : C. Galizzi, .....
- Applications visées : mesures de températures pariétales  
(interaction flamme-paroi)

## Pyrométrie au point de Christiansen

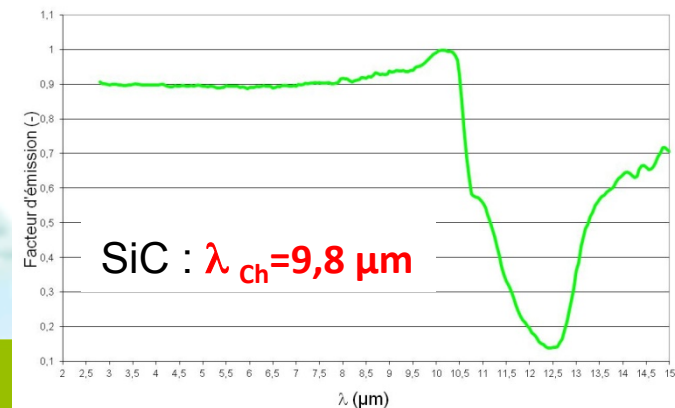
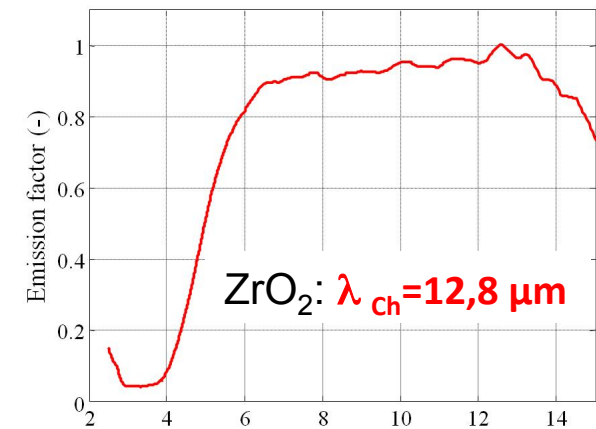
Agnès Delmas, Sébastien Le Foll, CETHIL

"L'objet dont on tente de mesurer la température est porteur de la référence absolue (corps noir)"

$$F_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}(T)}{I_{\lambda}^{\text{CN}}(T)}$$

### Principe de la méthode

Tout matériau diélectrique hétéropolaire présente **une fréquence particulière** pour laquelle son comportement vis à vis d'un rayonnement extérieur peut être assimilable à celui d'un **corps noir** : c'est la **fréquence Christiansen**

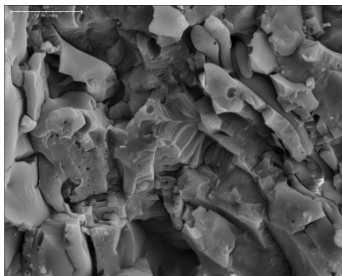


**Pyrométrie au point de Christiansen**  
*Agnès Delmas, Sébastien Le Foll, CETHIL*

**Matériau**

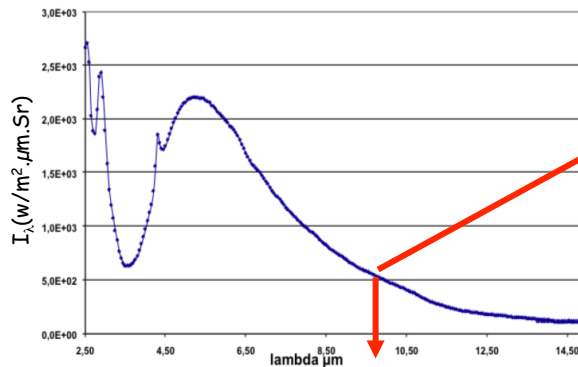
$Al_2O_3$   
 projetée plasma

$\lambda_{ch} = 9,8 \mu m$

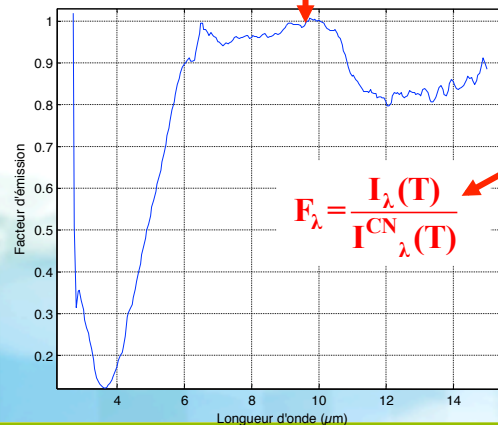


10  $\mu m$

**Mesures de Luminance  $I_\lambda$**



$\lambda_{ch} = 9,8 \mu m$



$$F_\lambda = \frac{I_\lambda(T)}{I_{CN_\lambda}(T)}$$

$$I_{\lambda_{ch}} = I_{\lambda_{ch}}^0(T) = \frac{C_1}{\lambda_{ch}^5} \frac{1}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda_{ch}T}\right] - 1}$$

**Détermination de T(K)**

$$T = \frac{C_2}{\lambda_{ch} \left[ \ln\left(\frac{C_1}{\lambda_{ch}^5 I_{\lambda_{ch}}} + 1\right) \right]}$$

	Mesures spectro	Mesures caméra	
T	Face arrière	Bande II	Bande III
$Al_2O_3$	980 K	978 K	985 K
	1128 K	1116 K	1125 K
		4 $\mu m$	9 $\mu m$

$\Delta T = 25 K$

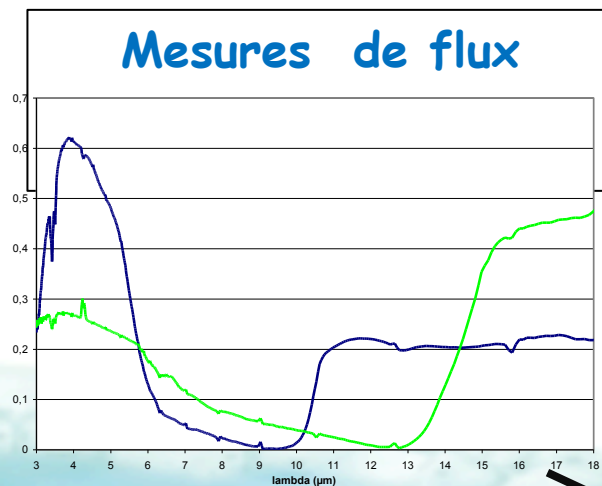


## Pyrométrie multispectrale

*Agnès Delmas, Jacques Jay*

### Principe général de la méthode

Identifier en même temps « la température  $T$  » et l'émissivité grâce à des mesures simultanées de flux dans plusieurs bandes spectrales  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3, \text{ etc..}$



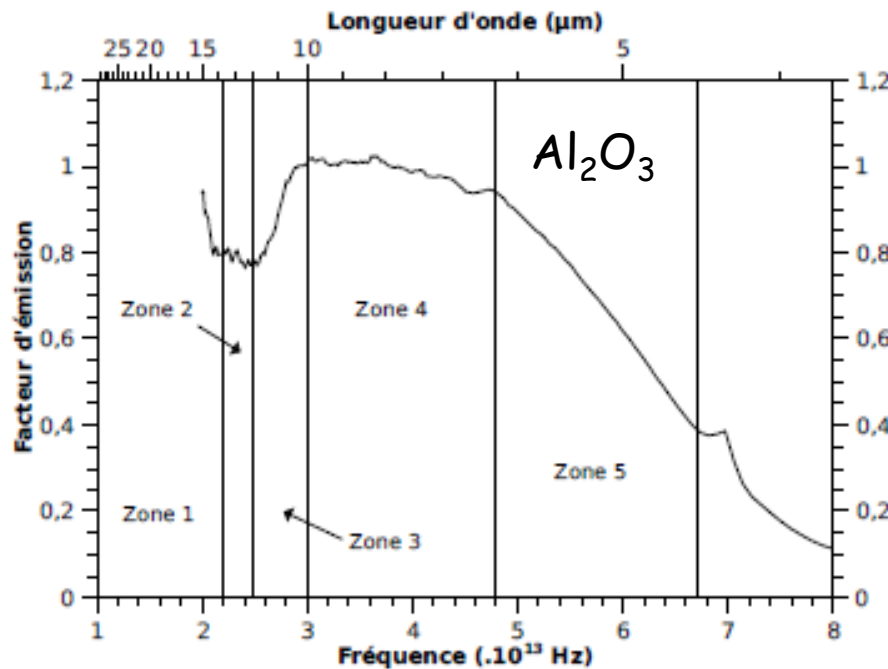
**Modèle d'émissivité**

$$\varepsilon_\lambda = a_0 \sqrt{2a_1^2 \frac{\left( \left[ 1 + \left( \frac{\lambda}{a_2} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right)}{\lambda^2}} + \frac{a_2}{(a_3 + \lambda^2)}$$

**Identification des  $N$  paramètres  $a_i$  et de  $T$**

**Pyrométrie multispectrale**  
Agnès Delmas, Jacques Jay

Est il possible d'appliquer la méthode à des milieux semi-transparents ?

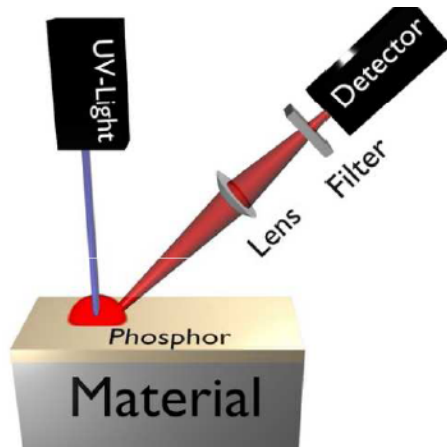


D'après B. Quinton 2010

Bandes du spectre utilisées pour l'identification	Paramètres identifiés	Température déterminée	$X^2_{zone4}$	$Y^2_{zone4}$
1-2-3-4-5	$\bar{\epsilon}_{\infty}$ $\Delta\epsilon$ $\nu_{TO}$ $a_{\gamma1}$ $\nu_{\gamma1}$ $x_{\gamma1}$ $a_{\gamma2}$ $\nu_{\gamma2}$ $x_{\gamma2}$	1173	1330	$2.10^{-3}$
4-5	$\bar{\epsilon}_{\infty}$ $\Delta\epsilon$ $\nu_{TO}$ $a_{\gamma2}$ $\nu_{\gamma2}$ $x_{\gamma2}$	1171	1388	$2,4.10^{-3}$
1-2-3-4	$\bar{\epsilon}_{\infty}$ $\Delta\epsilon$ $\nu_{TO}$ $a_{\gamma1}$ $\nu_{\gamma1}$ $x_{\gamma1}$	1179	9720	$9,4.10^{-3}$
4	$\bar{\epsilon}_{\infty}$ $\Delta\epsilon$ $\nu_{TO}$	1171	3731	$2,8.10^{-3}$

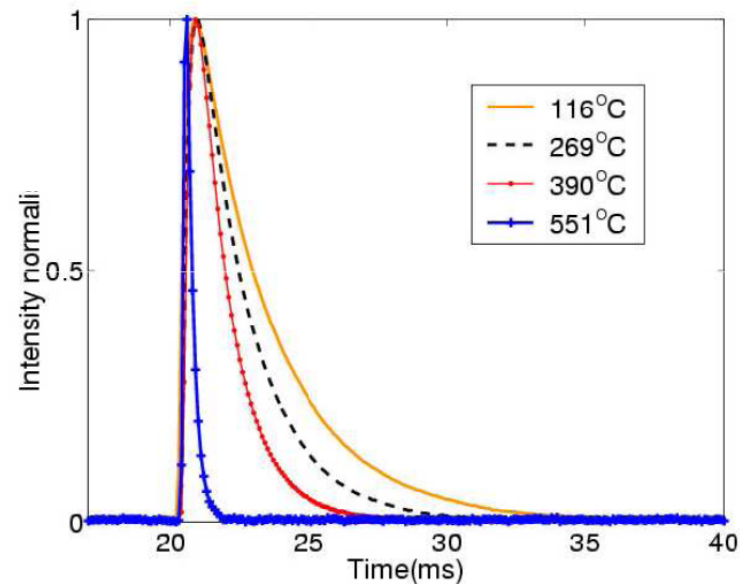
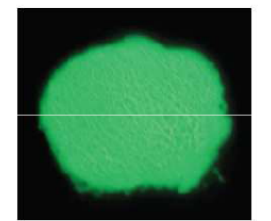
**NB :  $T_{christiansen} = 1776$  K**

## Principe e la méthode :



## Phosphorescence

Cédric Galizzi

[cedric.galizzi@insa-lyon.fr](mailto:cedric.galizzi@insa-lyon.fr)SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> : Eu<sup>2+</sup>

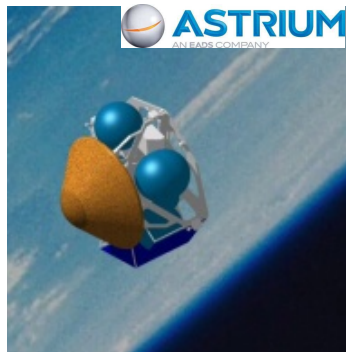
## Avantages :

- pas d'influence de la pression environnante sur le temps de décroissance du signal
- gamme de T: 20°C à 1800°C

## Inconvénients :

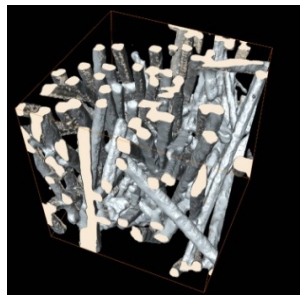
- calibrage
- modification de  $\epsilon$  paroi
- vieillissement revêtement ?

TPS du futur = matériau ablatif à très faible densité (feutre carbone)



**Quelle est la part du rayonnement thermique dans le transfert de chaleur global ?**

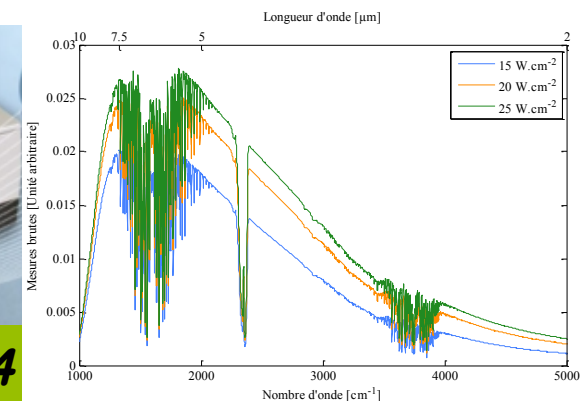
**Nécessité de connaître les propriétés radiatives et le champ de température interne de ce milieu semi-transparent**



$\Phi_{rad}$



Méthode basée sur la mesure spectrométrique du flux radiatif émis à haute température ( $T > 1500K$ )



# Identification des propriétés radiatives et des Températures

*S. Le Foll*

Développement d'une **méthode optique de caractérisation** utilisant **l'émission haute température** de milieu de faible densité

Identification des **coefficients d'extinction et de diffusion** d'un milieu homogène et de son **facteur d'émission**

Identification du **champ de température** interne



Système de  
chauffage laser

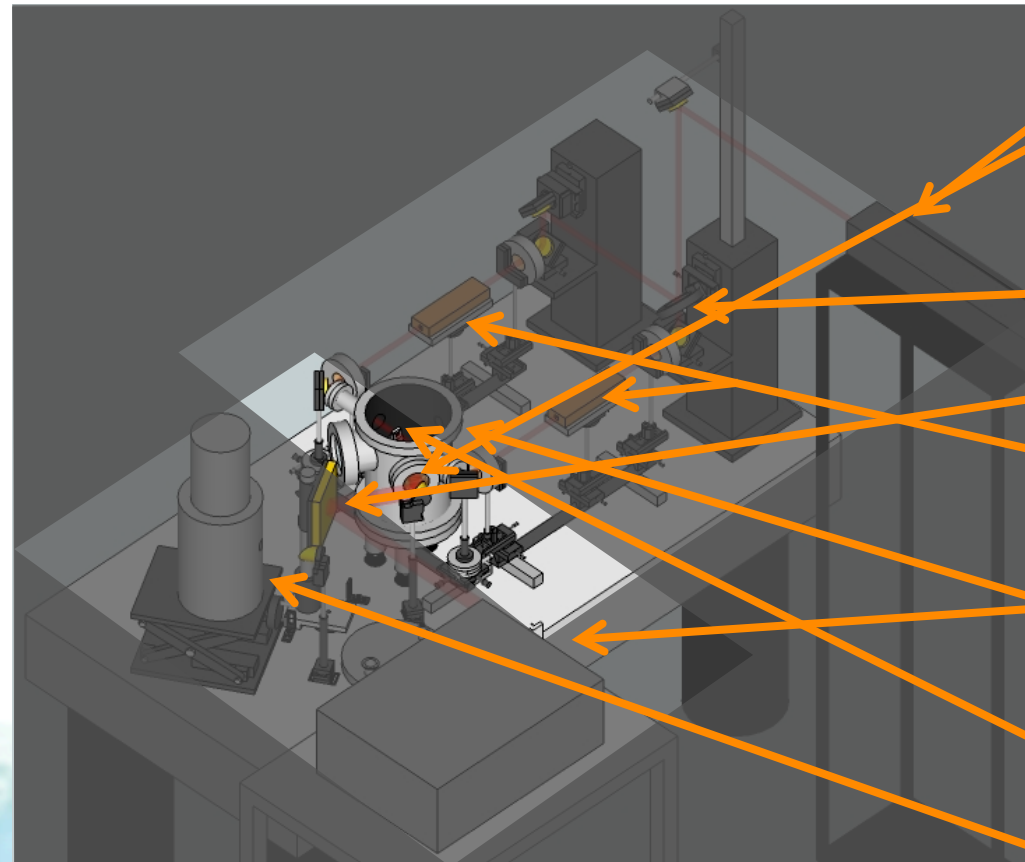
Chauffage  
symétrique

Chauffage  
homogène

Protégé de  
l'oxydation

Mesure d'émission  
Spectromètre FTIR

Mesure  
directionnelle  
Sur échantillon  
ou corps noir



Port  
Laser CO<sub>2</sub>  
d'émission

Séparatrice

Miroir plan

Kaléidoscope

Enceinte  
Spectromètre  
sous vide

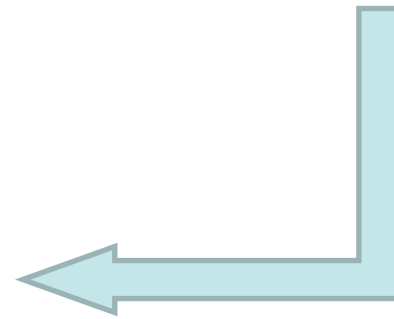
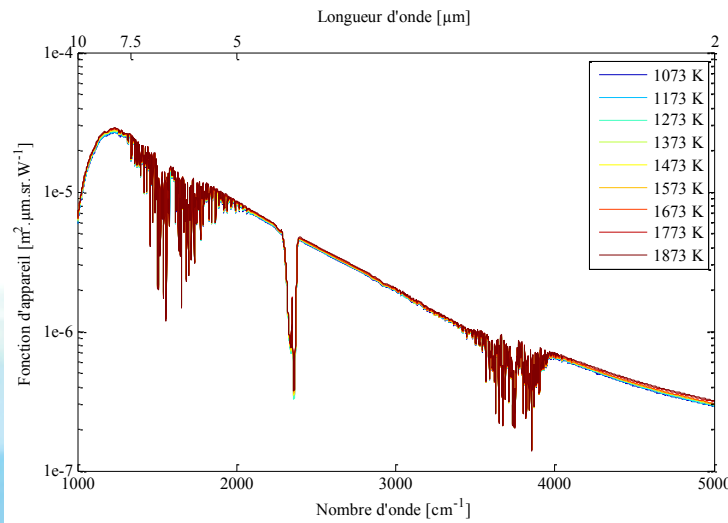
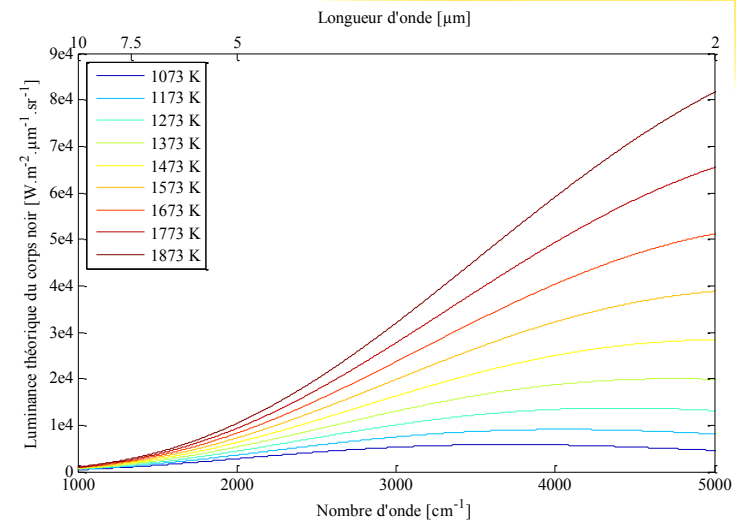
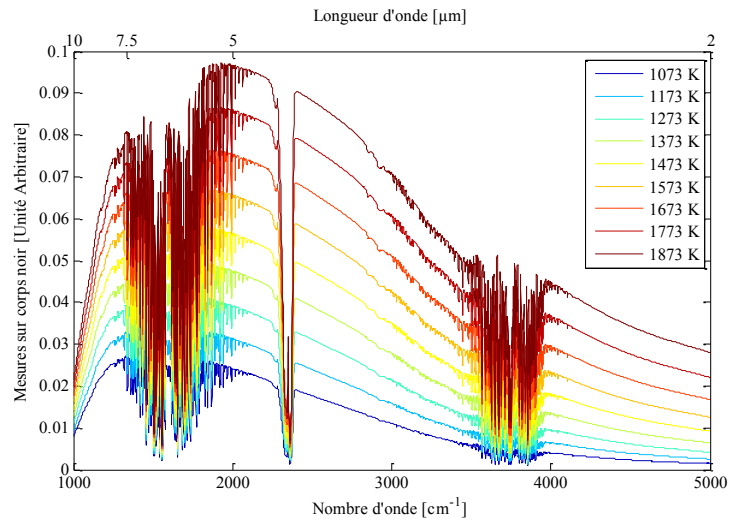
Echantillon

Corps noir

# 1-Banc spectrométrique

# 2 – Méthode d'identification

# 3 – Conclusion

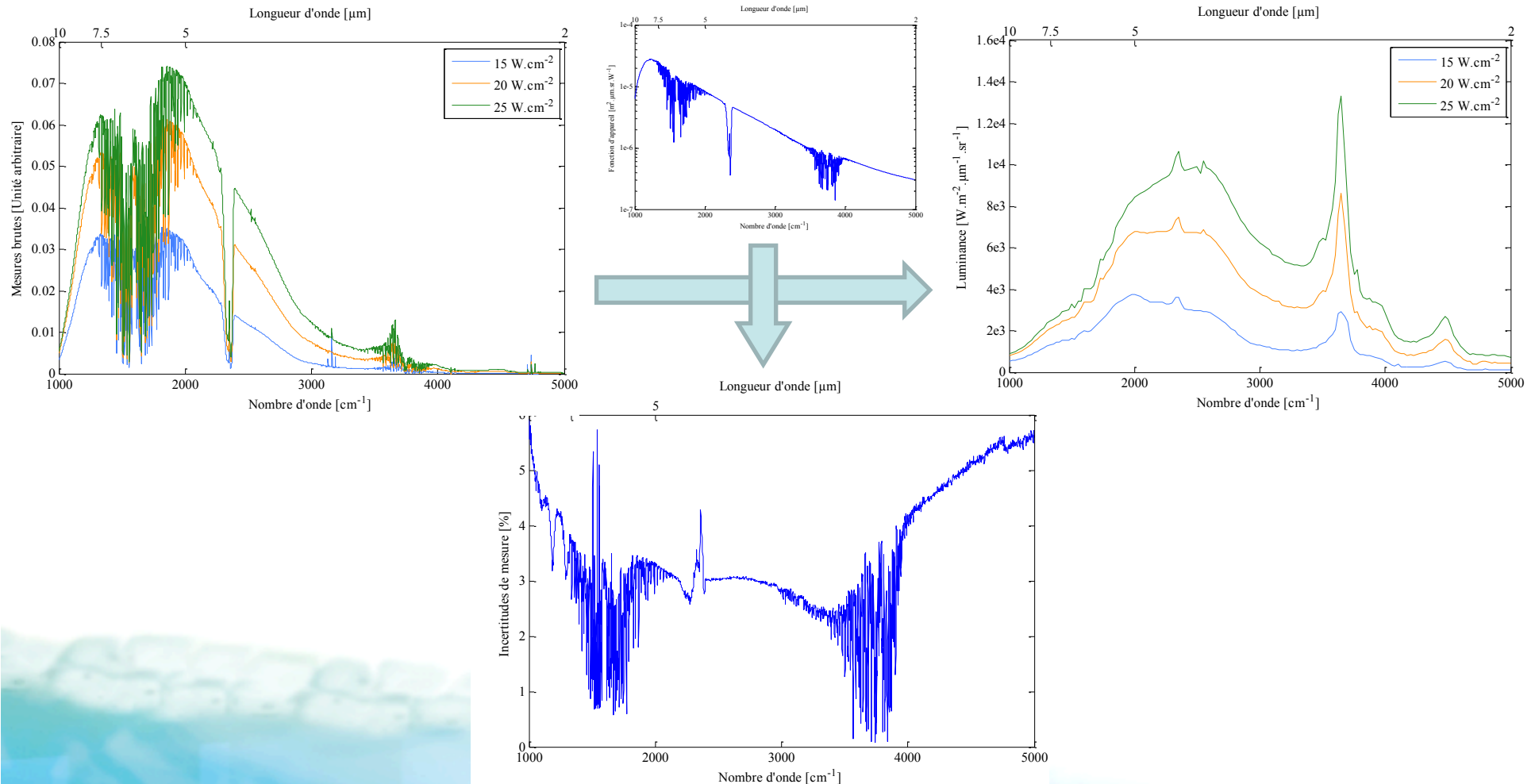




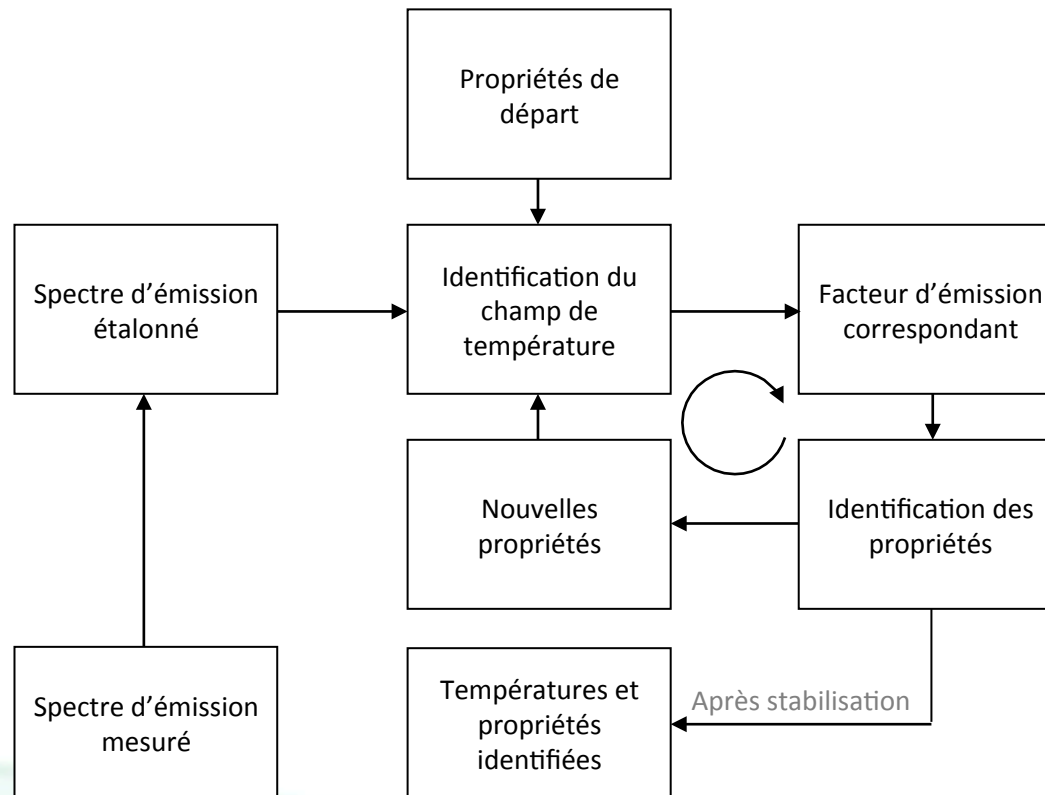
# 1-Banc spectrométrique

# 2 – Méthode d'identification

# 3 – Conclusion



$$\epsilon\% = 100. \max \left( \frac{|H_{\max}^{\text{Ech}}(\nu) - H_{\text{moy}}^{\text{Ech}}(\nu)|}{H_{\text{moy}}^{\text{Ech}}(\nu)}, \frac{|H_{\min}^{\text{Ech}}(\nu) - H_{\text{moy}}^{\text{Ech}}(\nu)|}{H_{\text{moy}}^{\text{Ech}}(\nu)} \right)$$

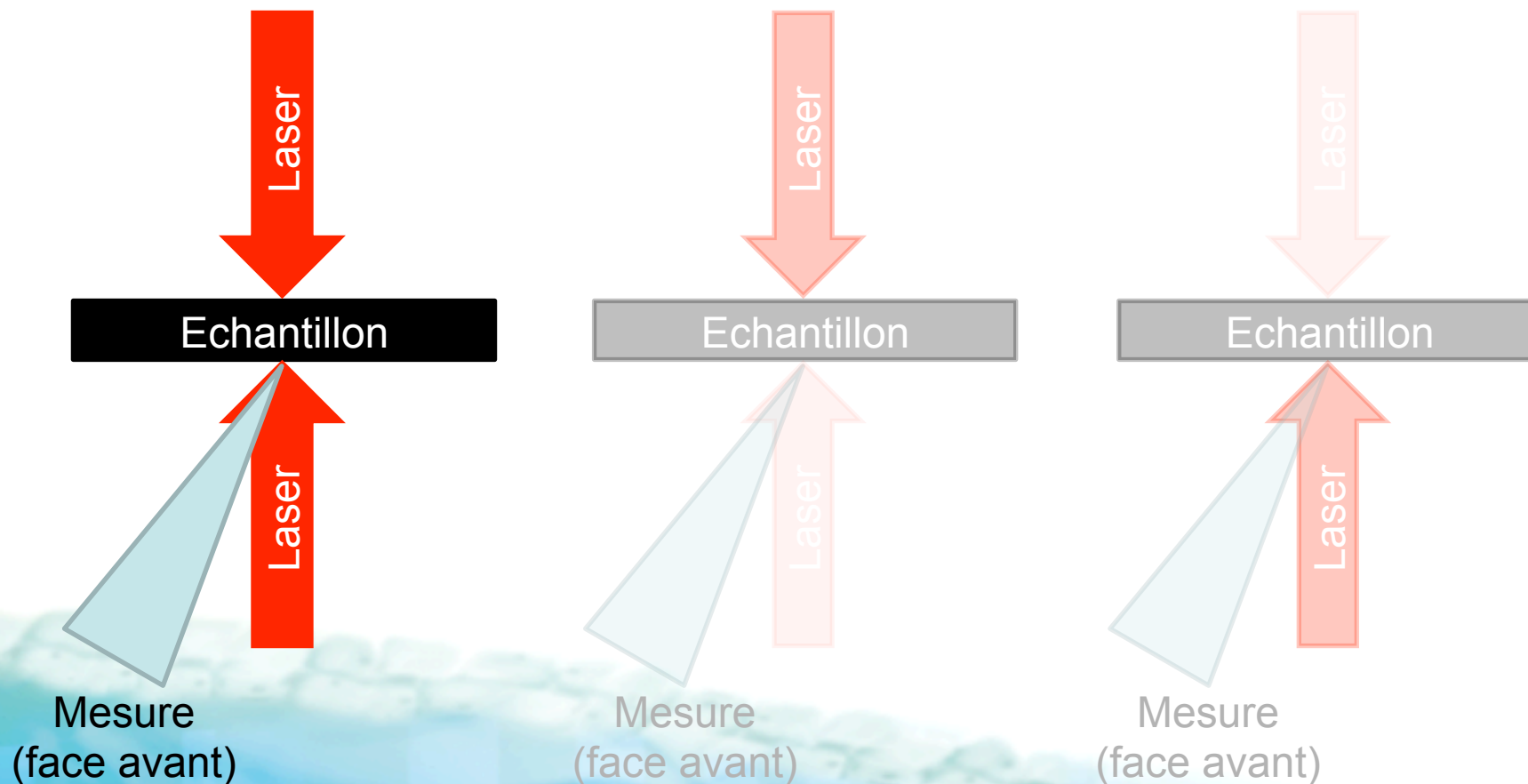


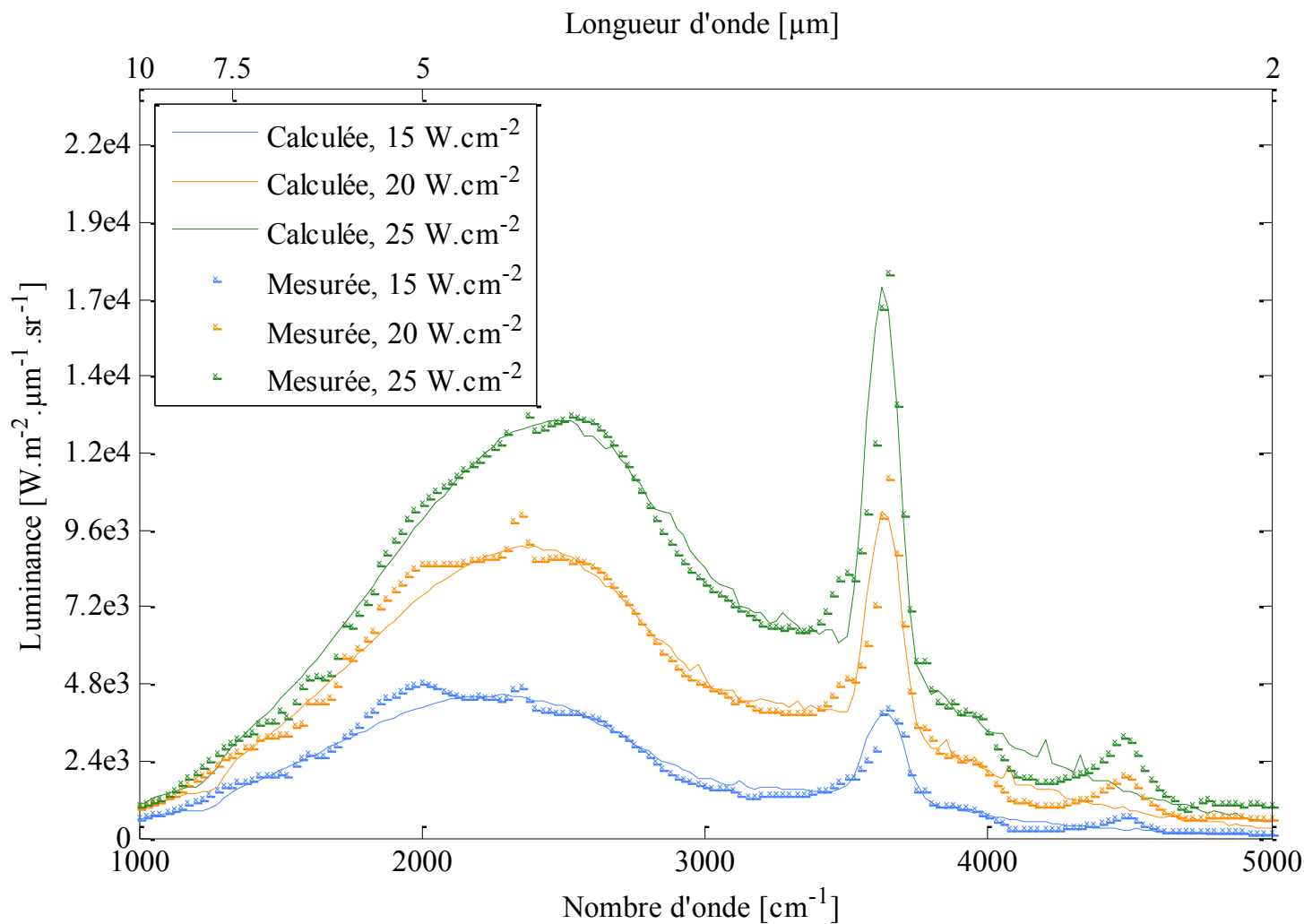
1 – Banc  
spectrométrique

2-Méthode  
d'identification

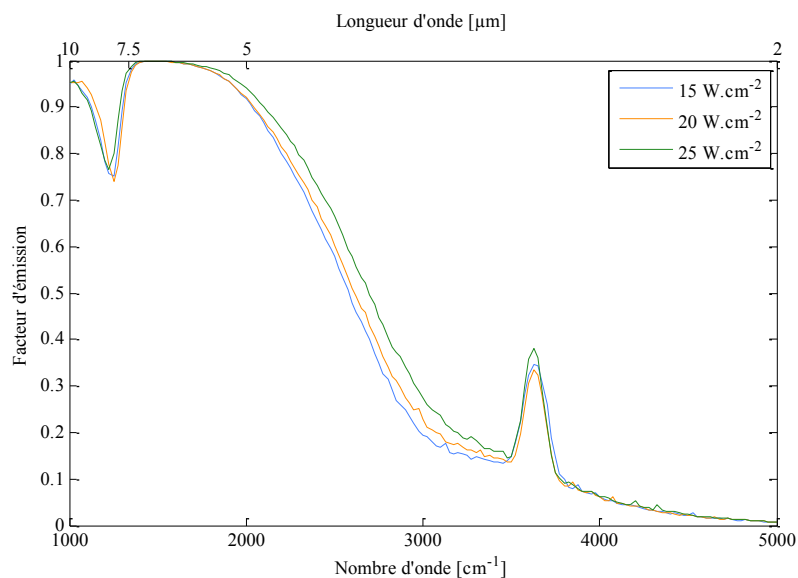
3 – Conclusion

Chauffage symétrique

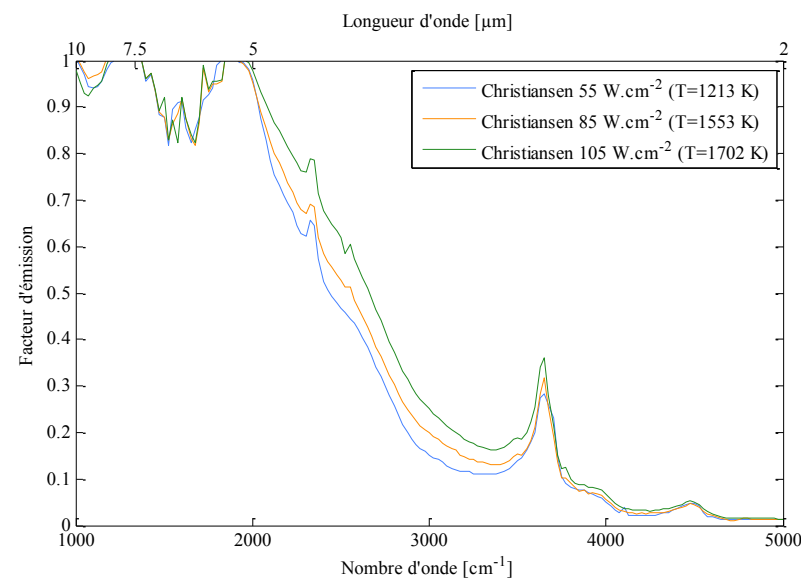




### Méthode Actuelle



### Pyrométrie de Christiansen



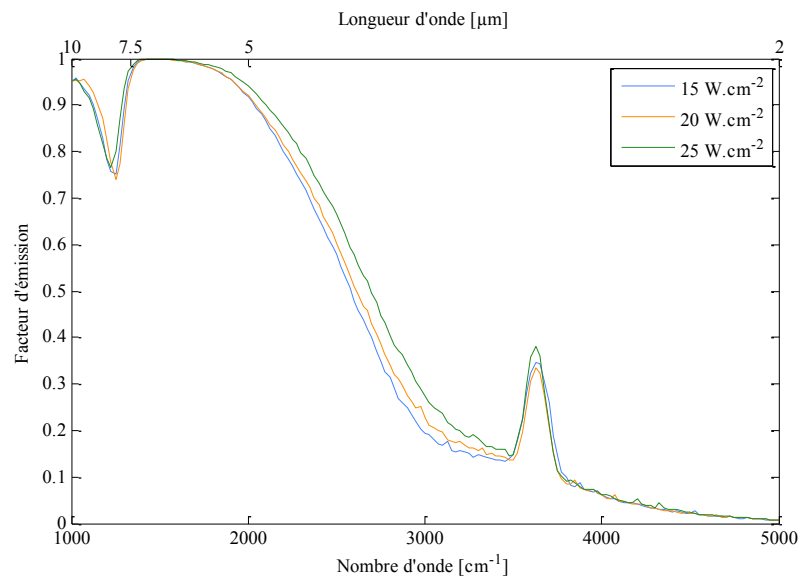
Ecart :

15 W.cm<sup>-2</sup> : Ti = 1152 K  
 20 W.cm<sup>-2</sup> : Ti = 1477 K  
 25 W.cm<sup>-2</sup> : Ti = 1677 K

5.0 %  
 4.9 %  
 1.5 %

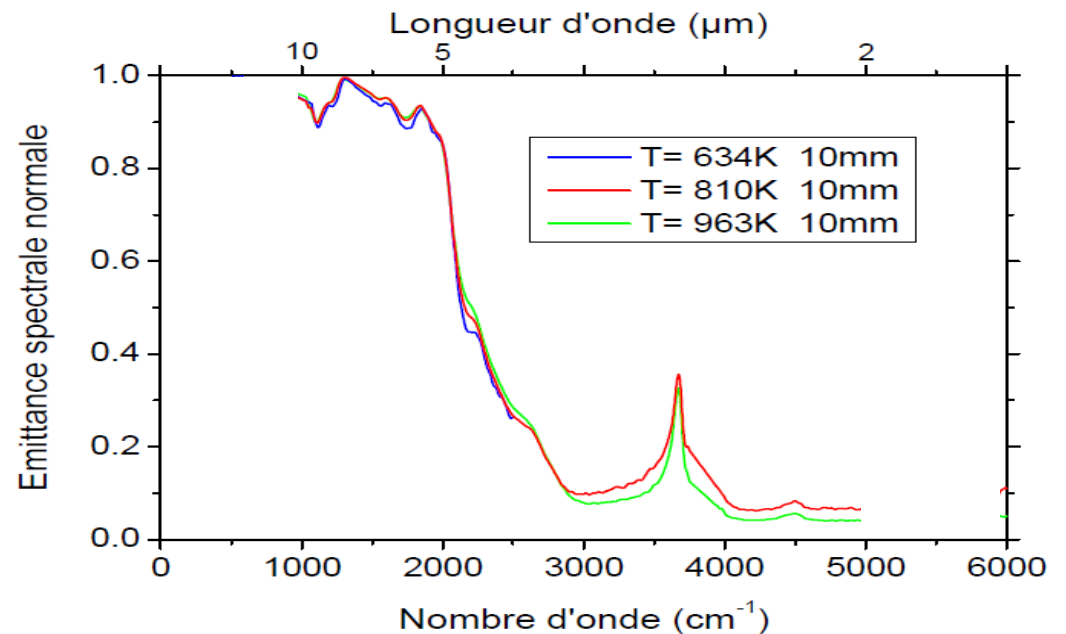
15 W.cm<sup>-2</sup> : Tc = 1213 K  
 20 W.cm<sup>-2</sup> : Tc = 1553 K  
 25 W.cm<sup>-2</sup> : Tc = 1702 K

Méthode Actuelle



15 W.cm<sup>-2</sup> : Ti = 1152 K  
 20 W.cm<sup>-2</sup> : Ti = 1477 K  
 25 W.cm<sup>-2</sup> : Ti = 1677 K

Données constructeur



DATA Source : STIL – 12 / 07 / 2011

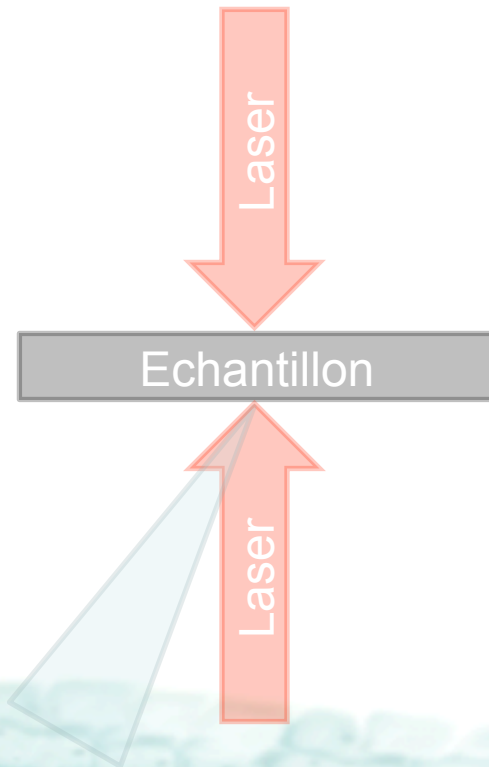
(Référence STIL/MES/1107232)

1 – Banc  
spectrométrique

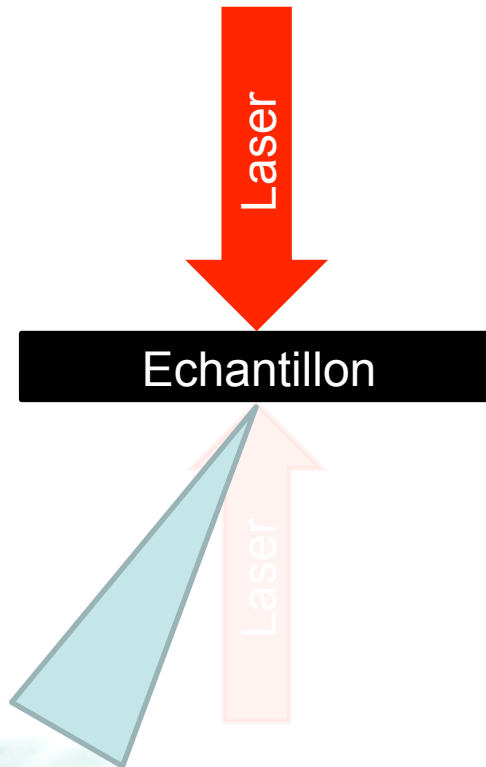
2-Méthode  
d'identification

3 – Conclusion

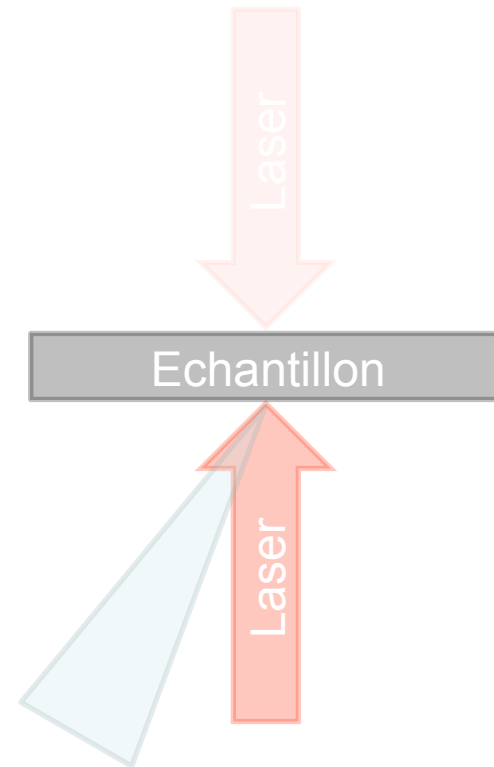
Chauffage asymétrique face arrière



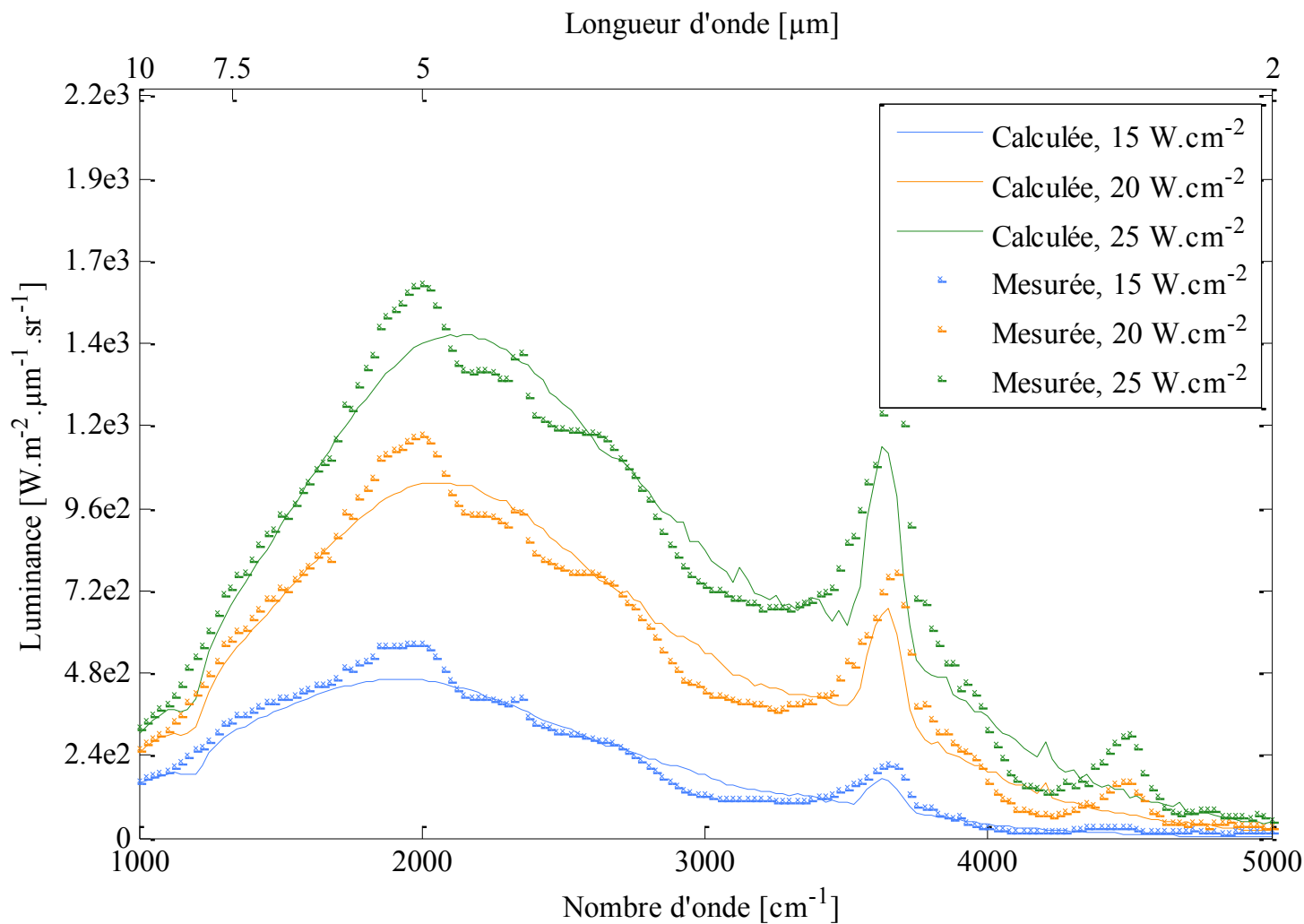
Mesure  
(face avant)



Mesure  
(face avant)

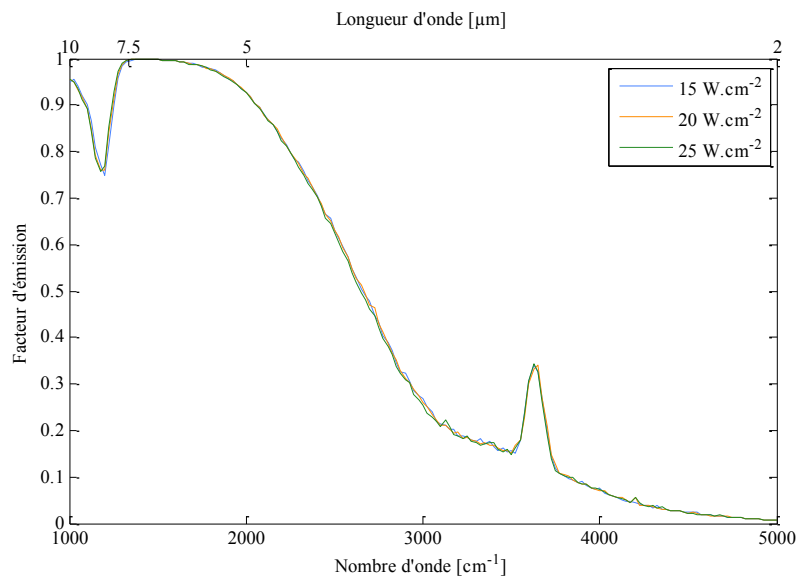


Mesure  
(face avant)

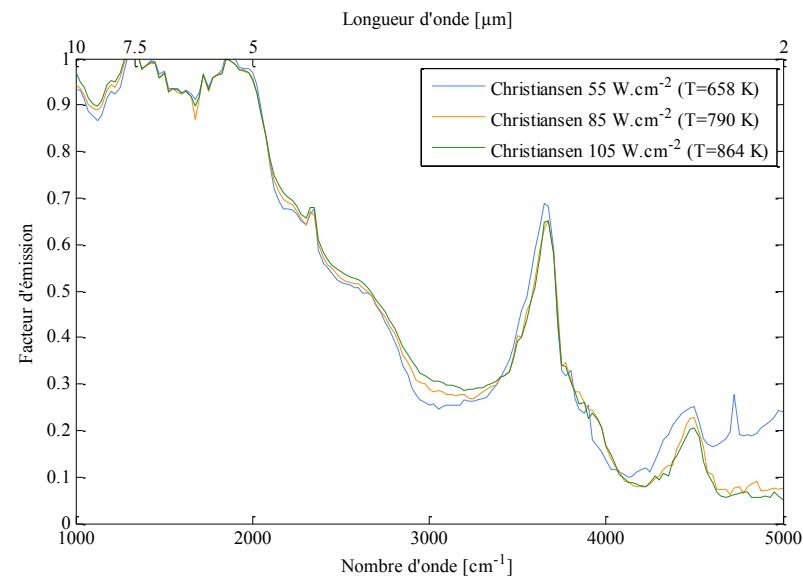




Méthode Actuelle



Pyrométrie de Christiansen



Ecart :

15 W.cm<sup>-2</sup> : Tsi = 634 K

3.6 %

15 W.cm<sup>-2</sup> : Tc = 658 K

20 W.cm<sup>-2</sup> : Tsi = 764 K

3.3 %

20 W.cm<sup>-2</sup> : Tc = 790 K

25 W.cm<sup>-2</sup> : Tsi = 842 K

2.8 %

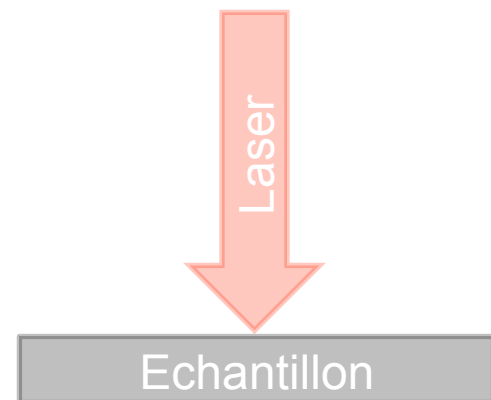
25 W.cm<sup>-2</sup> : Tc = 864 K

1 – Banc  
spectrométrique

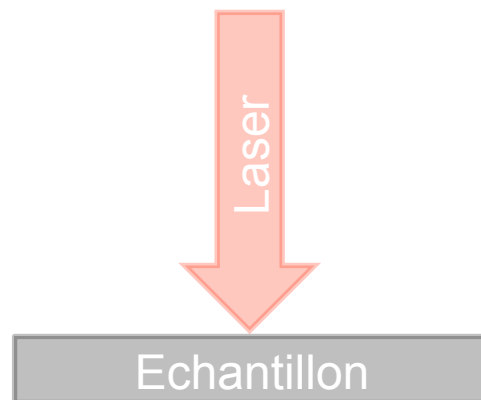
2-Méthode  
d'identification

3 – Conclusion

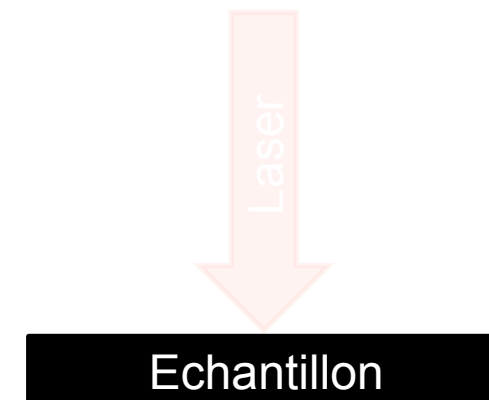
Chauffage asymétrique face avant



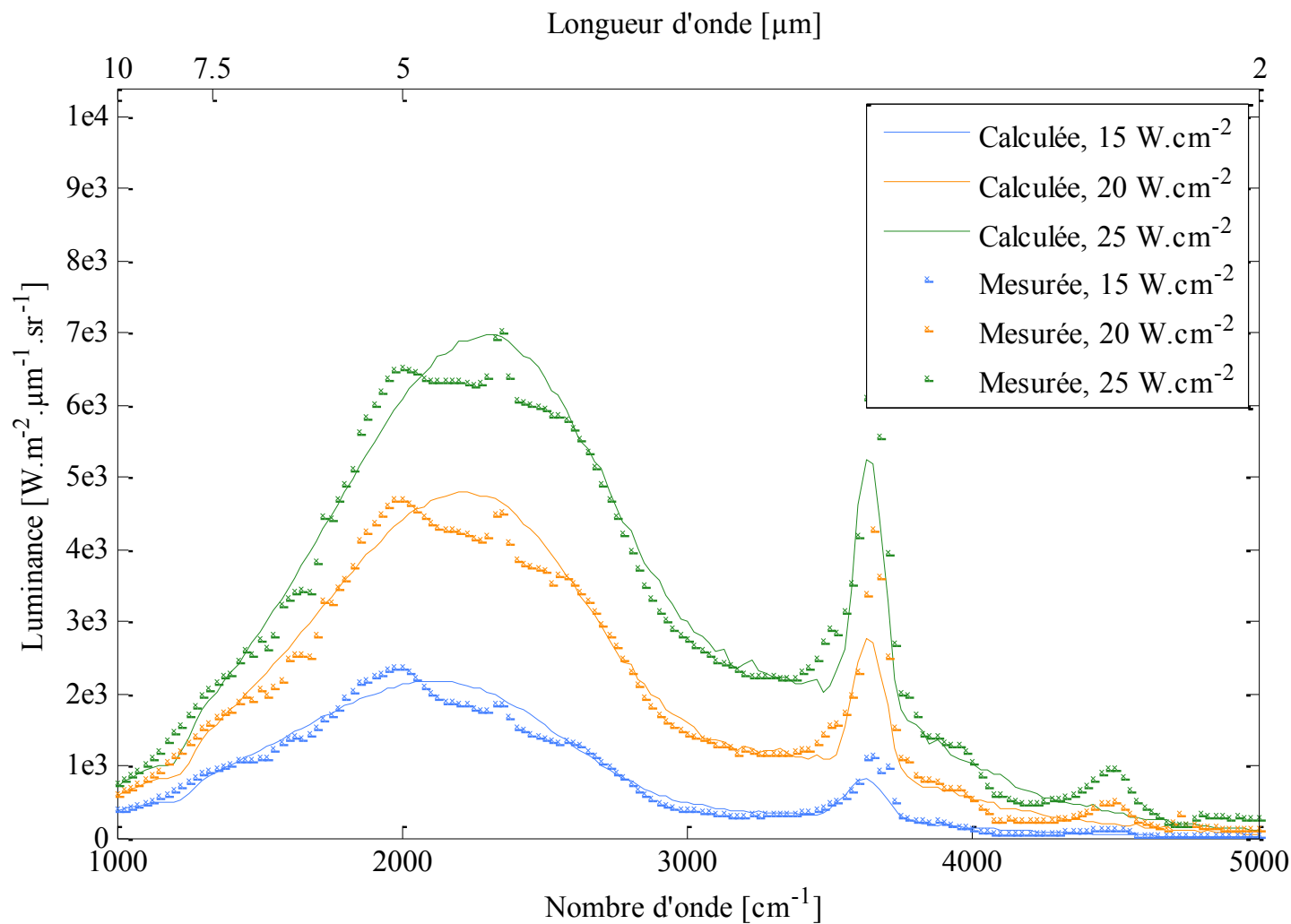
Mesure  
(face avant)



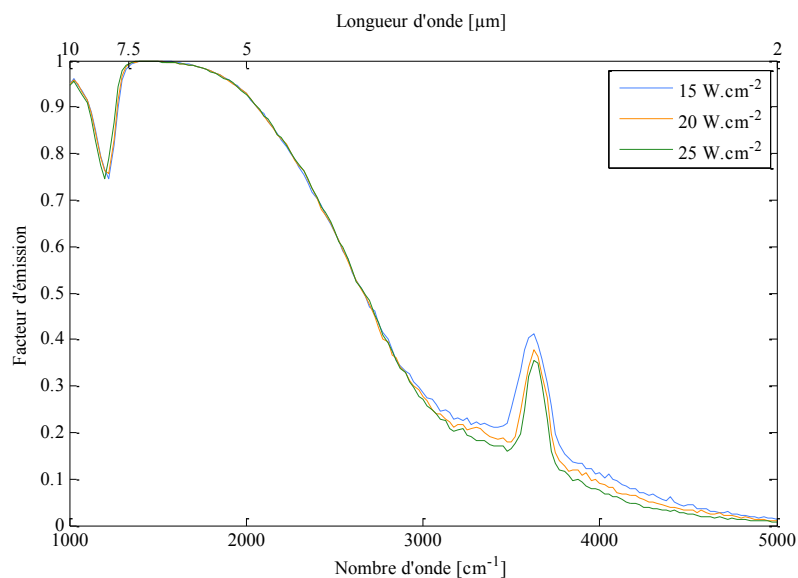
Mesure  
(face avant)



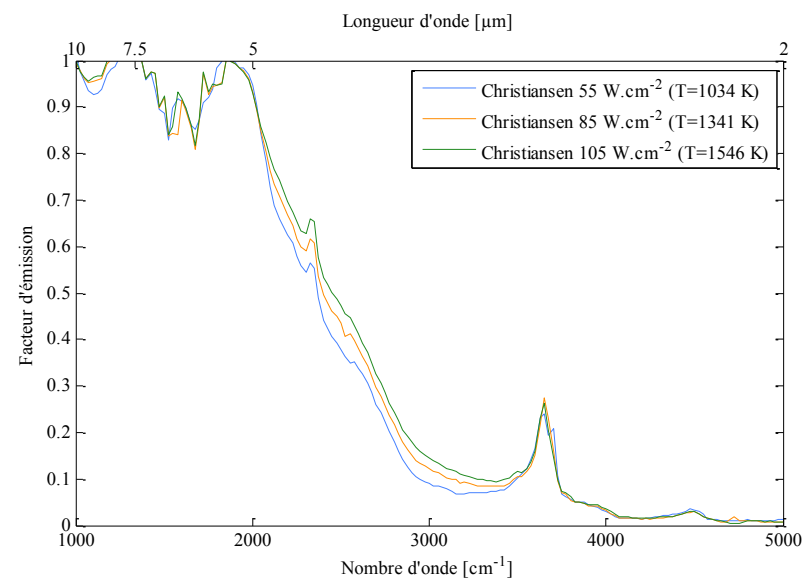
Mesure  
(face avant)



### Méthode Actuelle



### Pyrométrie de Christiansen



Ecart :

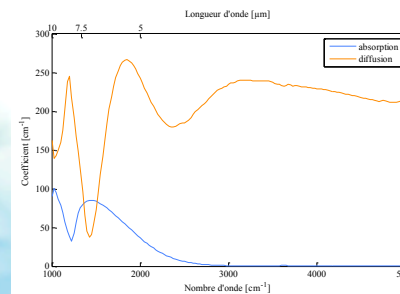
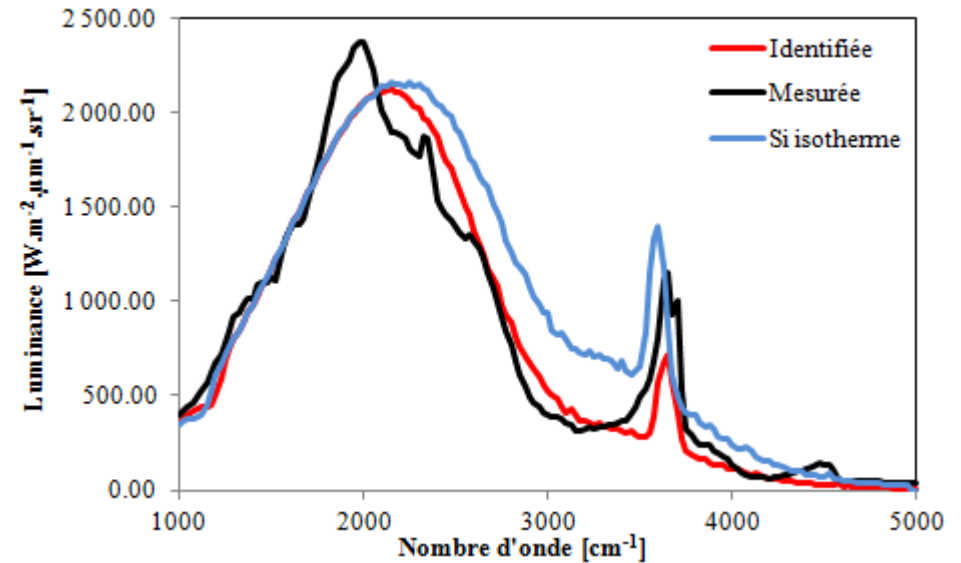
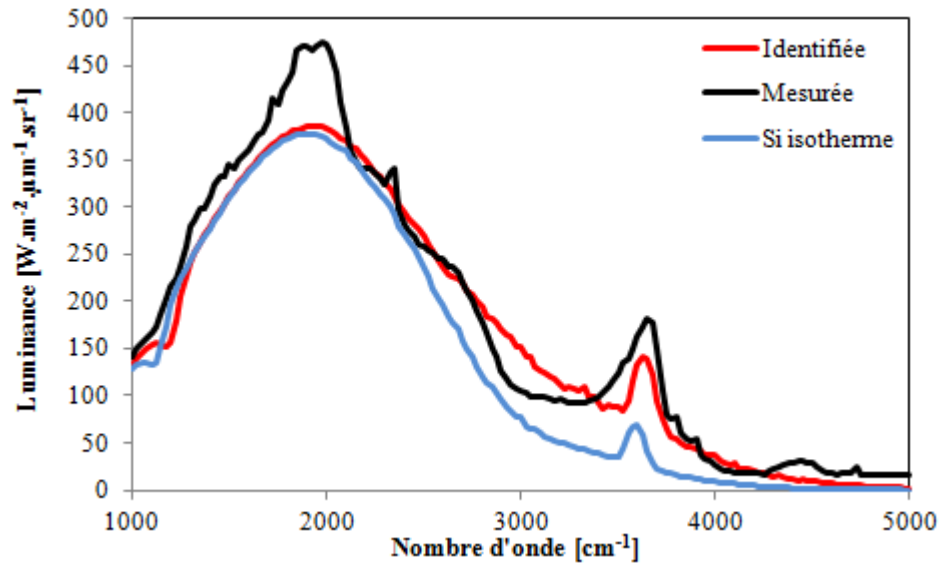
15 W.cm<sup>-2</sup> : T<sub>si</sub> = 1015 K  
 20 W.cm<sup>-2</sup> : T<sub>si</sub> = 1326 K  
 25 W.cm<sup>-2</sup> : T<sub>si</sub> = 1512 K

1.8 %  
 1.1 %  
 2.2 %

15 W.cm<sup>-2</sup> : T<sub>c</sub> = 1034 K  
 20 W.cm<sup>-2</sup> : T<sub>c</sub> = 1341 K  
 25 W.cm<sup>-2</sup> : T<sub>c</sub> = 1546 K

Impact de l'anisothermie sur le flux émis chauffage face arrière

Impact de l'anisothermie sur le flux émis chauffage face avant



1 – Banc  
spectrométrique

2-Méthode  
d'identification

3 – Conclusion

Champ de température identifié  
chauffage face arrière

Coté mesure

Températures  
Christiansen:

1034 K

1341 K

1546 K

1030 K	836 K	742 K	655 K	635 K	634 K
1538 K	993 K	812 K	771 K	765 K	764 K
1867 K	1005 K	902 K	851 K	842 K	842 K
1015 K	532 K	531 K	529 K	529 K	529 K
1326 K	890 K	889 K	879 K	865 K	756 K
1512 K	1161 K	1161 K	1161 K	1156 K	706 K

Températures  
Christiansen:

658 K

790 K

864 K

Coté mesure

Champ de température identifié  
chauffage face avant

1 – Banc  
spectrométrique

2 – Méthode  
d'identification

3 - Conclusion

Développement d'une **méthode optique de caractérisation** utilisant **l'émission haute température** de milieu de faible densité

Caractérisation des **propriétés radiatives à haute température**  
(Coefficients d'extinction et de diffusion d'un milieu homogène et facteur d'émission)

**Très bon accord avec la pyrométrie de Christiansen** pour les températures de surface, et les propriétés optiques et radiatives (fréquence de Christiansen notamment)

Permet la **caractérisation de milieux anisothermes**

L'identification du **champ de température interne** pour les matériaux de faible épaisseur optique est **réalisable mais nécessite encore quelques développements**