

*Mesure de la température de surface
d'un échantillon de bois
avec une poudre thermo-phosphorescente*

A. Chaudhary, G. Godard, A. Coppalle
ULR 6614 CORIA
Alexis.coppalle@coria.fr

Mesure de la température de surface d'un solide

➤ Pourquoi mesurer la température de surface d'un solide?

A vous de me répondre!



➤ A basses températures

Types de capteurs de température souvent utilisés *nécessitant un contact avec l'échantillon*:

- Les sondes à résistance de platine (Pt 100)
- Les thermistances (CTN)
- Les couples thermoélectriques (type K, J, N, T, ...)



Egalement utilisable: la pyrométrie visible ou infrarouge

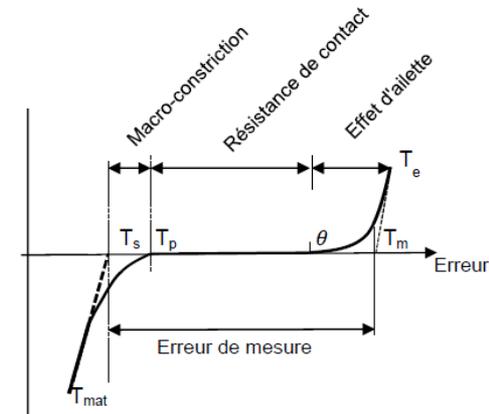
➤ Mais des questions et des précautions à prendre

Pour les couples thermoélectriques: biais du au contact

Pour la pyrométrie

l'émissivité doit être connue

==> A température ambiante ou faible, les valeurs sont disponibles



Mesure de la température de surface d'un solide

➤ A hautes températures

Seuls Les couples thermoélectriques (type K,,...) sont possibles

Egalement utilisable la pyrométrie ou la thermographie infrarouges

➤ les mêmes questions se posent mais avec plus d'acuité



Thermocouple fin 'collé' ?

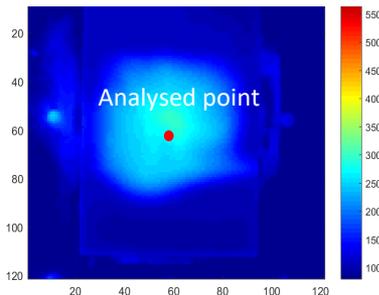


thermocouple de gros diamètre:
rigide 'en pression' ?



toujours un Pb de contact

la thermographie infrarouge



**valeur de l'émissivité à haute température
pour les matériaux dégradés**

Mesure de la température de surface d'un solide

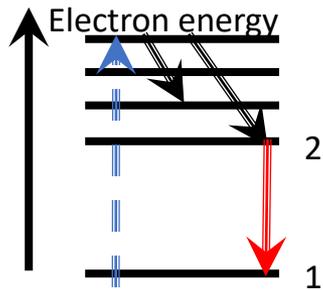
➤ *Mesure en utilisant le signal de poudres thermo-phosphorescente*

➤ **Méthode connue depuis plusieurs années**

*S. W. Allison and G. T. Gillies: Review of Scientific Instruments 1997 (68)

*Brübach, J., Pflitsch, C., Dreizler, A. and Atakan, B., 2013. Progress in Energy and Combustion Science, 39(1).

*Aldén, M., Omrane, A., Richter, M. and Särner, G., 2011. Progress in energy and combustion science, 37(4).



--- Excitation par absorption d'un photon (laser à UV)

Désexcitation par collision

Emission de photons (signal de phosphorescence dans le rouge)

Le nombre de photons émis N_2 est contrôlé par deux processus

$$\frac{dN_2}{dt} = - (W_{2-1}^{rad} + W_{2-1}^{coll}) N_2$$

Processus **radiatif** + collisionnel

W_{2-1}^{rad} ==> Signal de phosphorescence qui dépend aussi des efficacités de collisions

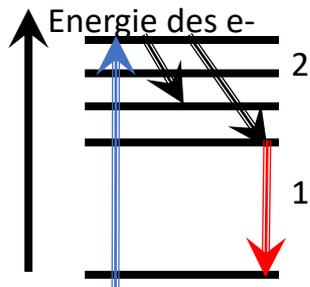
W_{2-1}^{rad} et W_{2-1}^{coll} dépendent de la température =

==> Le signal de phosphorescence dépend aussi de la température

➤ La durée de processus d'émission est proportionnel à

$$1 / (W_{2-1}^{rad} \text{ et } W_{2-1}^{coll}) \text{ (lifetime)}$$

Utilisation de poudres thermo-phosphorescente déposées sur une surface



2 Exitation par absorption d'un photon (laser à UV)

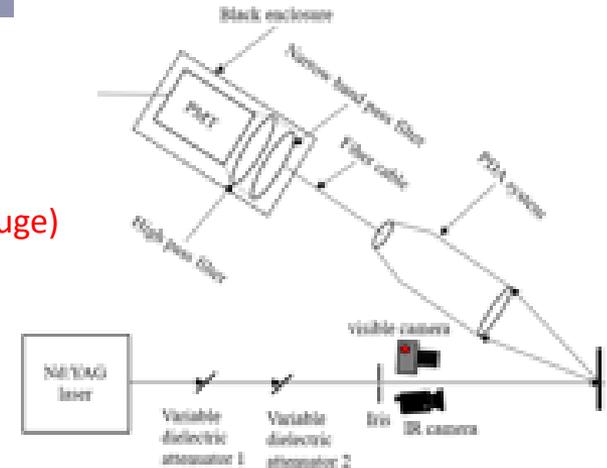
Désexcitation par collision

1 Emission de photons (signal de phosphorescence dans le rouge)

Concrètement

- Une fois déposées sur la surface et excitées par une longueur d'onde appropriée, principalement la lumière UV, les particules de phosphore émettent une lumière lumineuse intense, décalée en fréquence, appelée phosphorescence
- Après l'excitation du phosphore, l'émission est imagée sur un détecteur et la température est enregistrée à partir des propriétés spectrales ou temporelles du signal enregistré.
- Cette technique est précise et n'est pas influencée par l'émissivité du matériau, la réflexion de fond de l'environnement
- Cette technique nécessite un étalonnage

Rq: Les atomes actifs sont souvent un métal de terre rare



Les deux principales méthodes pour l'analyse du signal

➤ Mesure du rapport d'intensité à deux longueurs d'onde

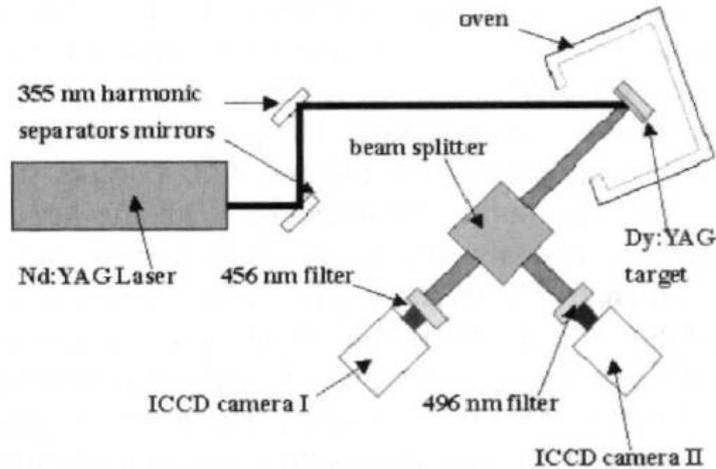
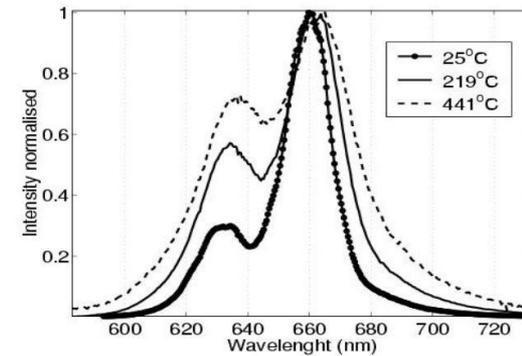


Schéma du système d'imagerie thermique à rapport d'intensité

Exemple de signaux obtenus à différentes températures



$$\text{Intensity Ratio, } R = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I_{642 \text{ nm}}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} I_{660 \text{ nm}}(t) dt}$$

➤ R dépend de la température

➤ Cette méthode, bien que délicate à mettre en oeuvre,

est intéressante pour faire de l'imagerie 2D

Les deux principales méthodes pour l'analyse du signal

- Mesure du temps de décroissance temporelle du signal total

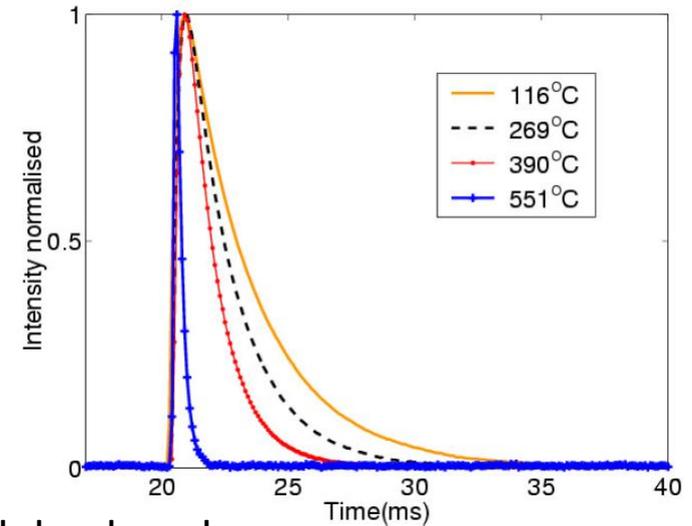
Le signal total suit une décroissance temporelle

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Où, I_0 est l'intensité d'émission initiale,

t est le temps et τ est le temps de décroissance du signal de phosphorescence.

τ est le temps pendant lequel l'intensité a diminué jusqu'à $1/e$ de la valeur initiale I_0 .



- Simple à mettre en oeuvre

- Mesures ponctuelles

====> méthode choisie dans cette étude

Facteurs qui peuvent influencer l'intensité du signal

➤ Un point sensible: La deposition sur la surface

- Les phosphores sont mélangés à liant, et appliqués sur la surface par pulvérisation, il faut maintenir une surface uniforme et de contrôler l'épaisseur.



-L'épaisseur du revêtement doit rester faible pour éviter les gradients thermiques entre le revêtement de phosphore et le substrat.

- L'épaisseur déposée est un compromis entre

une valeur minimale permettant d'avoir un signal suffisant

et une valeur maximum qui ne perturbe pas les transferts thermiques à la surface.

====>10 micron est un bon compromis

➤ Autres facteurs pouvant influencer l'émission

- *Activator concentrations*

(in the binder)

- *Saturation effects*

- *Impurities in phosphors:*

- *Particle size*

➤ Dans le cas de cette étude

- $\text{Mg}_4\text{FGeO}_6:\text{Mn}$ - phosphore

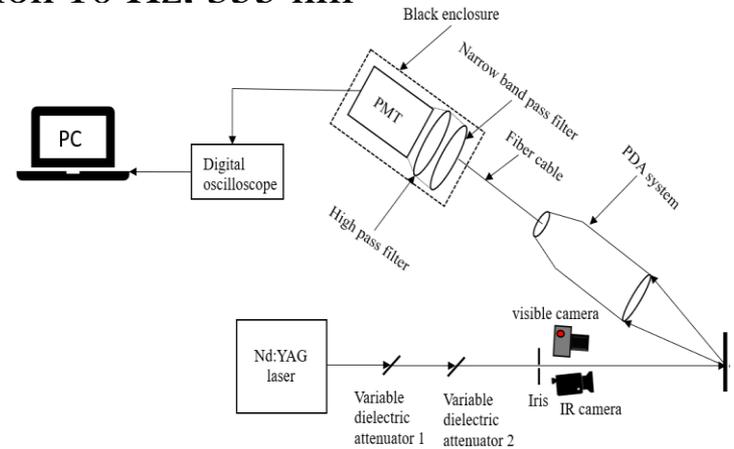
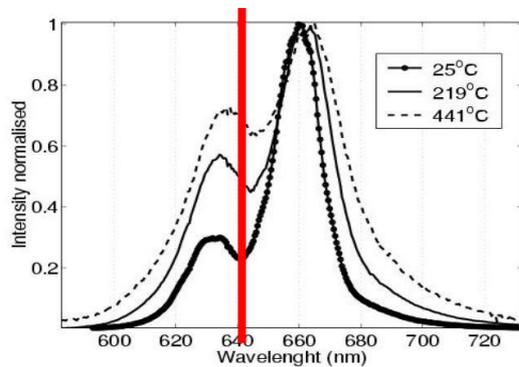
-Temps de vie de 3.3 ms à 5 μs pour le domaine 300-900K

-Liant : liquide céramique, (Zyp Coatings, Inc., HPC)

-Concentration massique:5 %.

dispositif optique:

- ND:YAG laser (durée du pulse ~4-6ns, repetition 10 Hz. 355 nm)
- Détection: PM
- Filtre : 642/10 nm



La décroissance temporelle du signal peut être modélisé par:

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau) + B,$$

I_0 est l'intensité d'émission initiale,

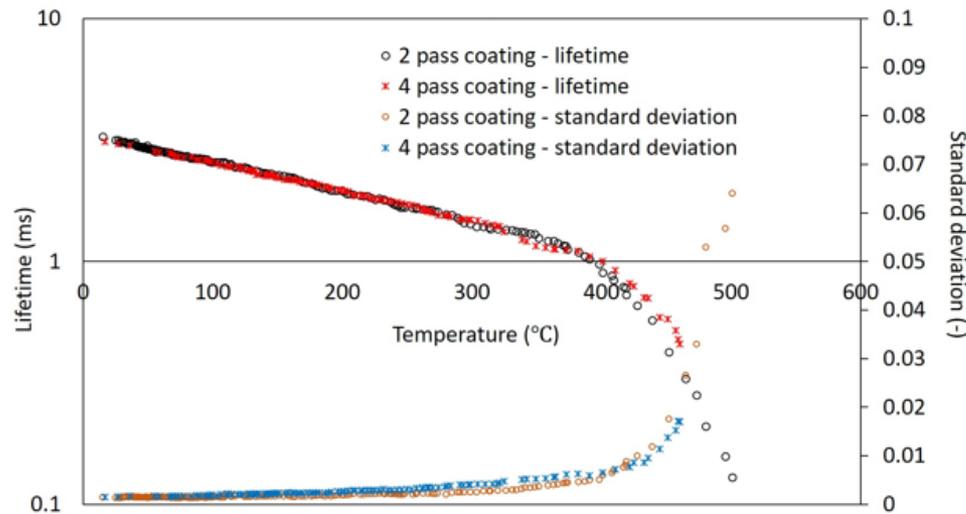
τ est la durée de vie du signal de phosphorescence.

B est la ligne de base.

- Pour une température fixée, plusieurs signaux sont analysés et la moyenne des τ est calculée

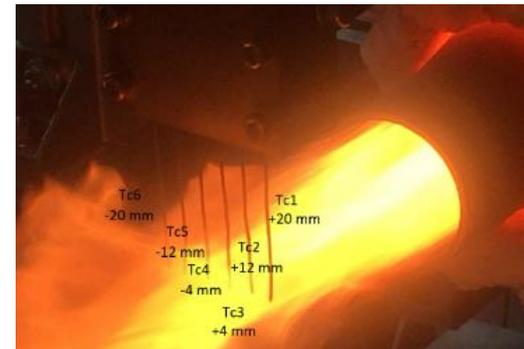
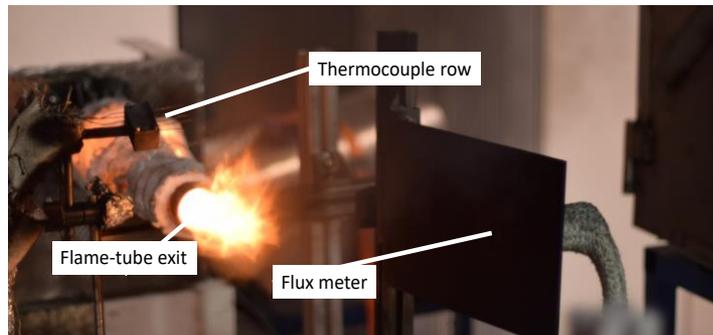
La courbe d'étalonnage $\tau=\tau(T)$

- effectué à l'aide d'une fine plaque d'acier inoxydable
 - Sur une face, un thermocouple de type K est soudé
 - Une couche de phosphore est appliquée dessus.
 - Sur l'autre face, chauffage avec un chalumeau.
- ==> en changeant la distance chalumeau/plaque acier, on fait varier la température au niveau du TC



==> Application à la mesure de la température de surface d'une plaque de bois

Dispositif de chauffage
Un bruleur à flamme de kérosène
(Schuhler FSJ 2021)



Flux et températures contrôlés
Temperature de flamme 980°C
Flux à la paroi 113 kW/m²

==> Application à la mesure de la température de surface d'une plaque de bois

Vues de la plaque de bois (contreplaqué 12mm)
en cours de dégradation

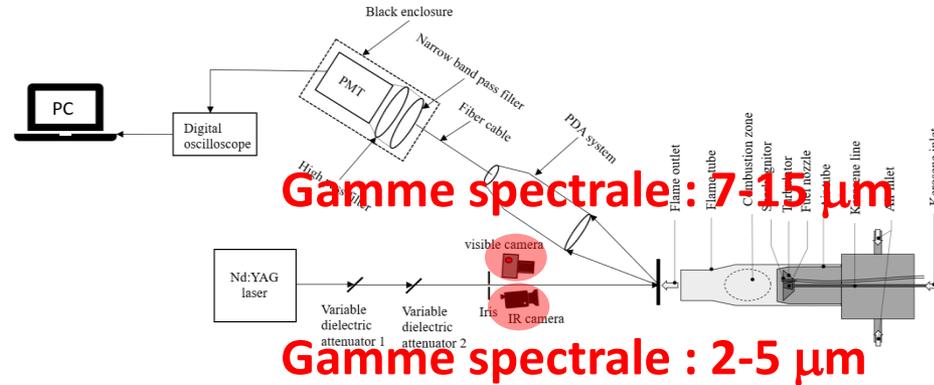
Tache laser
d'excitation

Zone de dépôt
de la poudre

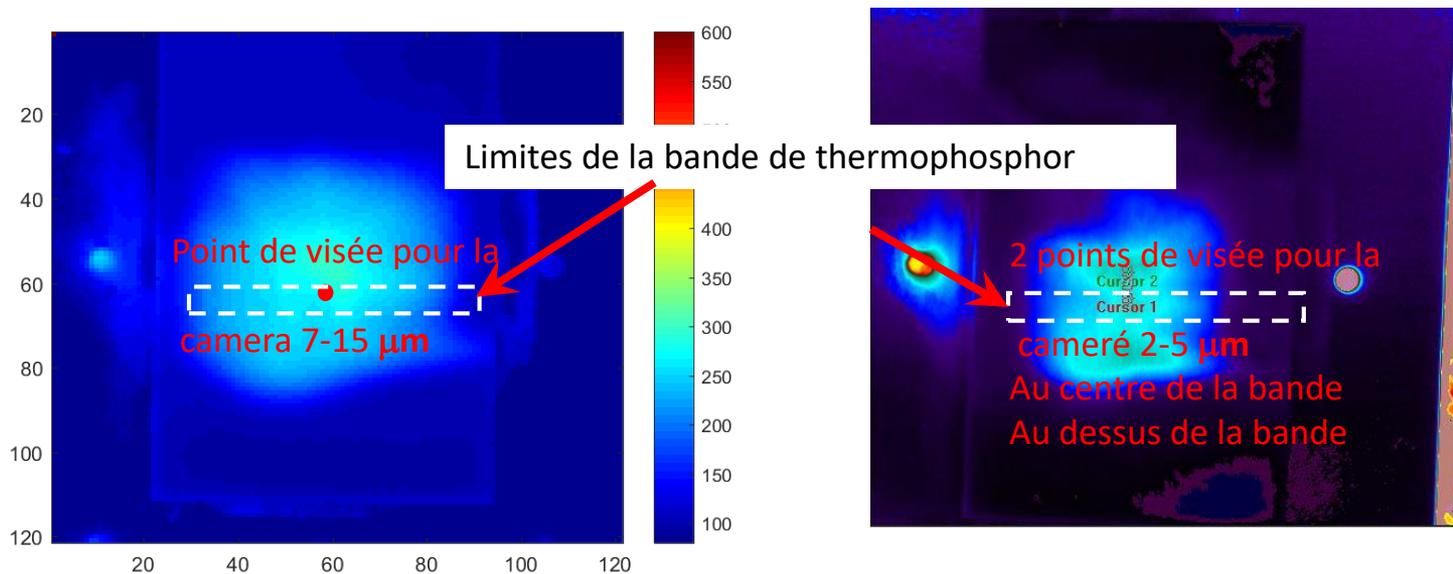


==> Application à la mesure de la température de surface d'une plaque de bois

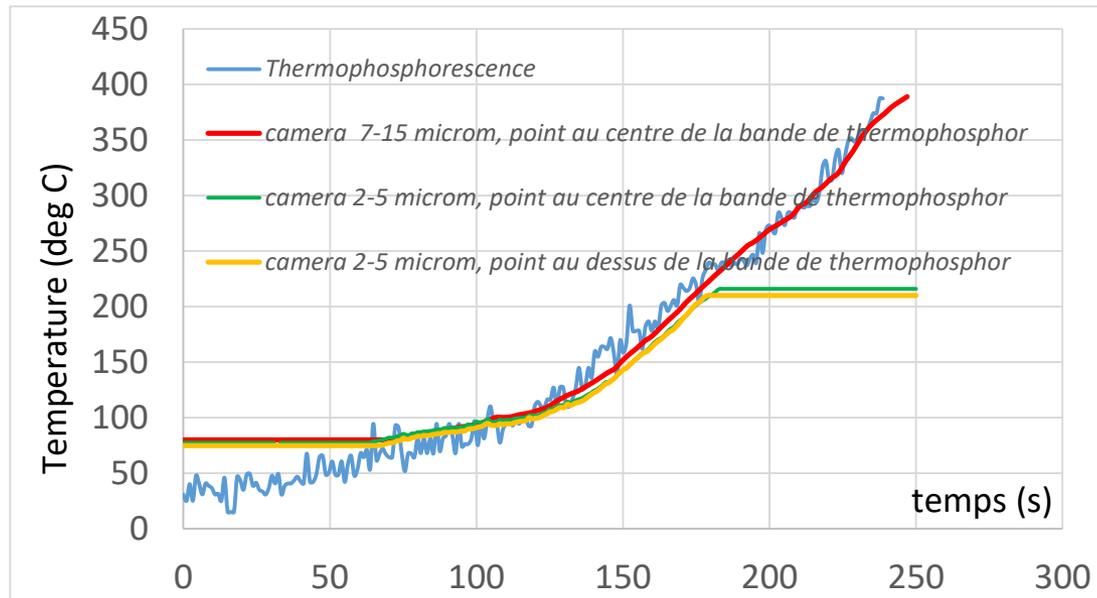
- Utilisation de 2 cameras IR, visant l'arrière de l'échantillon



- Cartographie des températures obtenues avec les deux cameras



➤ Résultat pour le test 1

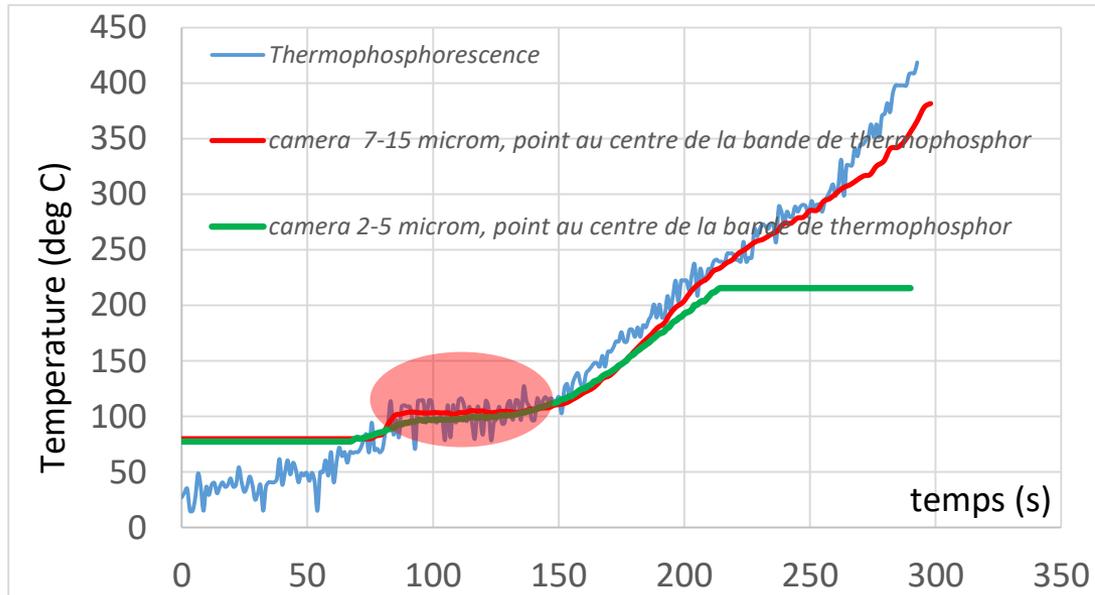


- Camera 2-5 μm : 80-229 °C
- Camera 7-15 μm : 80-400 °C

Pour les deux cameras IR
====> émissivité = 0.92

- Très bon accord entre les deux cameras IR
====> *pas de variation de l'émissivité du bois entre 2-5 μm et 7-15 μm*
- Très bonne accord entre la méthode par thermo-phosphorescence et par I.R.
- Superposition des Tp au centre et au dessus de la bande de phosphore
====> *le dépôt (10 μm) n'a pas d'influence sur les transferts thermiques*

➤ Résultat pour le test 2

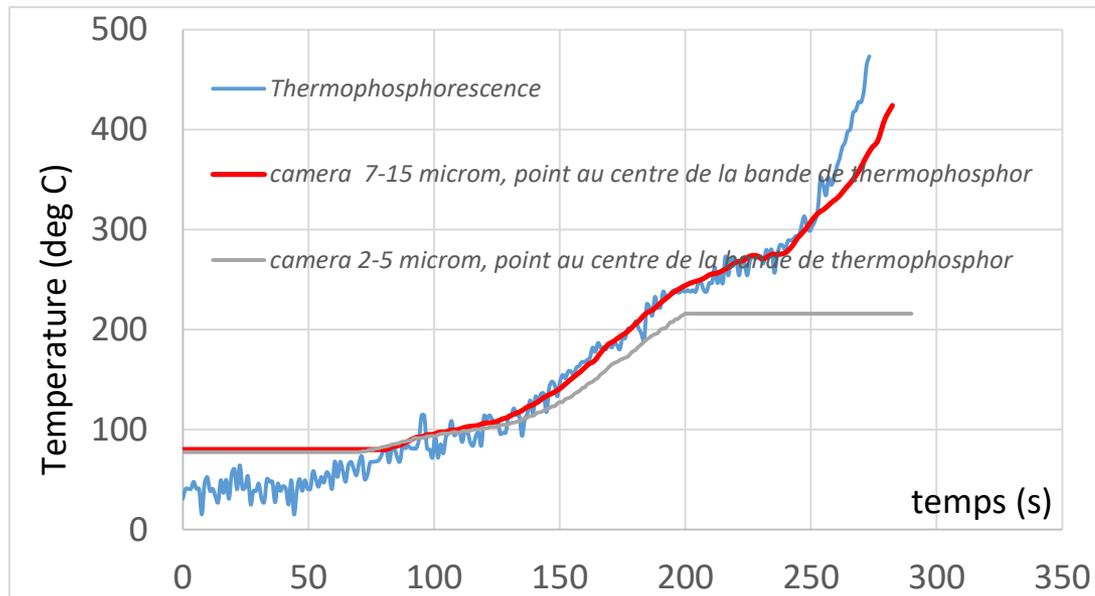


- Camera 2-5 μm : 80-229 °C
- Camera 7-15 μm : 80-400 °C
- Pour les deux cameras IR
====> émissivité = 0.92

- Très bon accord entre les deux cameras IR
====> *pas de variation de l'émissivité du bois entre 2-5 μm et 7-15 μm*
- Très bonne accord entre la méthode par thermophosphorescence et par I.R.

Rq ; Par rapport au test 1, la phase de séchage plus longue

➤ Résultat pour le test 3



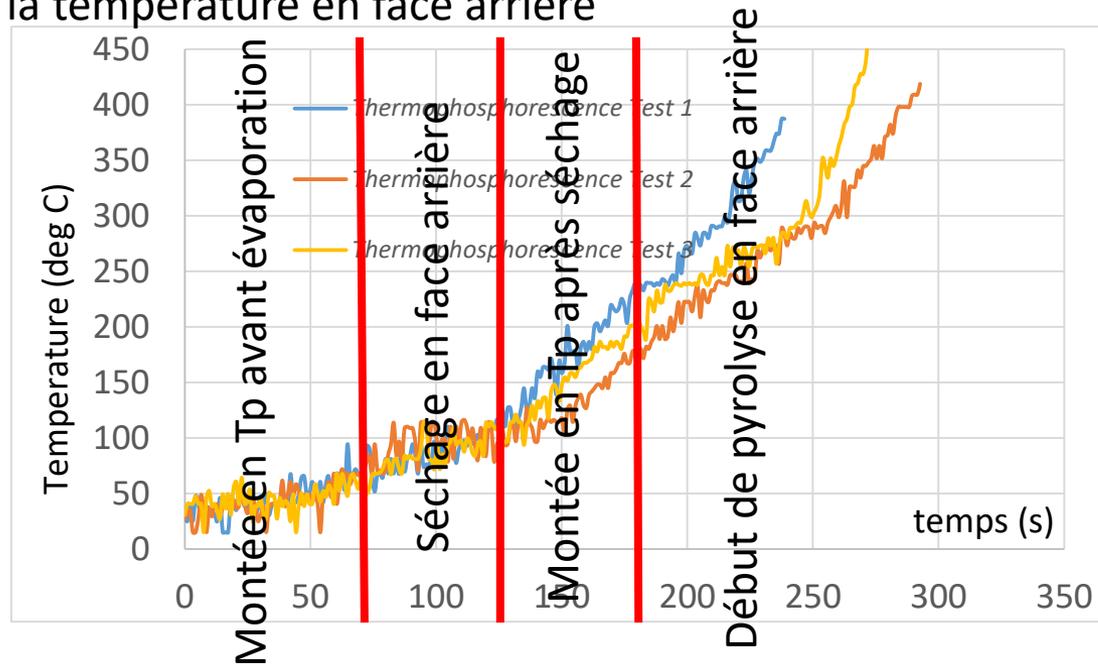
- Camera 2-5 μm : 80-229 °C
- Camera 7-15 μm : 80-400 °C
- Pour les deux cameras IR
- ==> émissivité = 0.92

- Très bon accord entre les deux cameras IR
==> pas de variation de l'émissivité du bois entre 2-5 μm et 7-15 μm
- Très bonne accord entre la méthode par thermophosphorescence et par I.R.

➤ Résultat pour les 3 tests

Echantillon: contreplaqué de 12mm

Analyse de la température en face arrière



Quelques conclusions sur la mesure de T_p de surface avec des poudres phosphorescentes

A partir des premiers essais sur la face arrière d'une plaque de bois chauffée, on peut affirmer que

- La mise en œuvre de la méthode est assez simple, à part la disponibilité de la source laser
==> des travaux sont prévus pour montrer la faisabilité avec des sources LED plus compactes
- La mesure de la T_p de surface d'un matériau chauffé s'affranchit des inconvénients
 - rencontrés lors de l'utilisation des T_c (Pb de contact)
 - rencontrés lors de l'utilisation de la thermographie IR (Pb émissivité à $H_t T_p$)
- Avec une calibration soignée, la méthode est précise
- L'utilisation simultanée d'une caméra IR permet de déterminer l'émissivité du matériau à $H_t T_p$ dans la gamme spectrale de la caméra
- Prochains travaux: application de la méthode sur une plaque de bois dégradée
==> mesure de l'émissivité du char