

Utilisation de la Phosphorescence induite par plan laser du ZnO pour la mesure instantanée de champs de températures. Application à l'étude des jets auxiliaires débouchant dans un écoulement transverse

Arun Subramanian, Patrick Berterretche, **Gildas Lalizel**, Eva Dorignac.

*1 av Clément Ader. ISAE-ENSMA. Téléport 2.
86360 Chasseneuil du Poitou.*

le jeudi 20 Octobre 2022, Espace Hamelin, Paris.

Plan de présentation

1. Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.
2. Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO
3. Mise en place de la métrologie de mesure de température sur le banc d'essai BATH.
4. Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

Plan de présentation

1. Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.
2. Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO
3. Mise en place de la métrologie de mesure de température sur le banc d'essai BATH.
4. Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.

- Turbine aéronautique: ensemble d'aubes servant à pressuriser les gaz avant d'être brûlés.
- L'enthalpie de ces gaz brûlés génère la poussée ET la mise en rotation de l'arbre principal.
- Pour diminuer les émissions polluantes et augmenter la poussée, il faut augmenter la température des gaz brûlés.
- Les aubes de turbines soumises aux gaz chauds sont refroidies par:
 - impact de jet
 - film de refroidissement ou « film-cooling ».
- Optimisation de la forme des trous, de l'angle des trous, de la distance entre les trous.
- Ecoulement académique: le Jet Débouchant dans un Ecoulement Transverse.

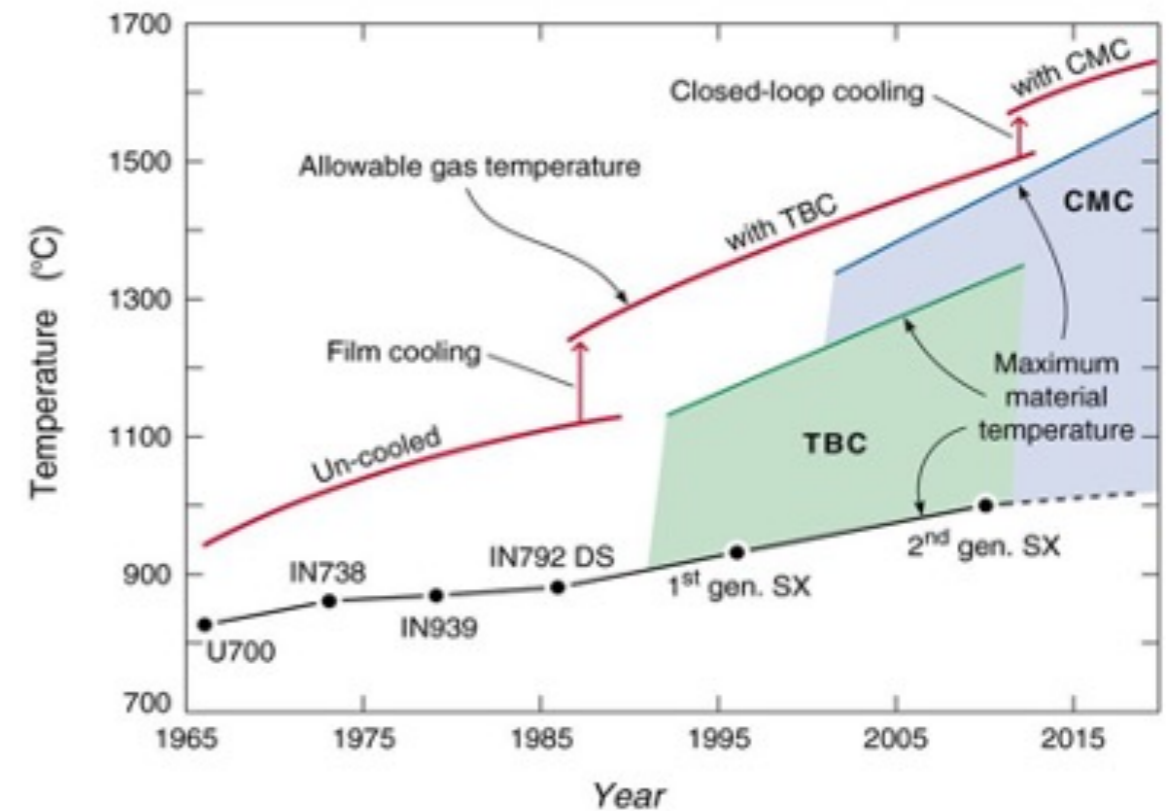


figure 1: évolution des températures des parois en fonction du développement des matériaux et des techniques de l'optimisation des techniques de refroidissement.

Positionnement de trous de films de refroidissement.

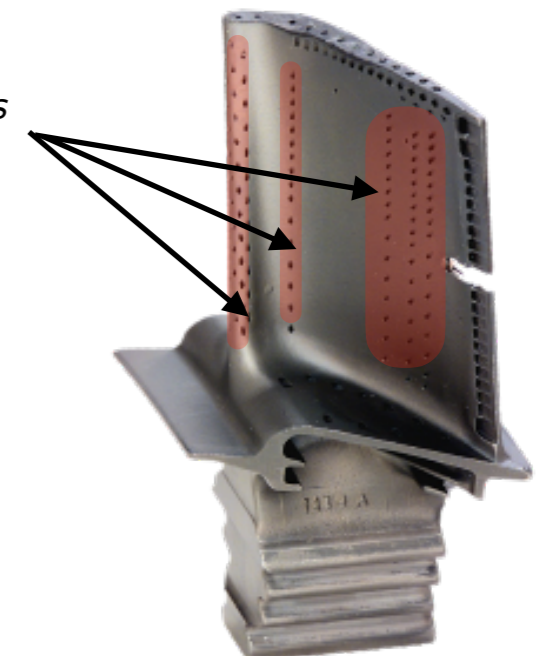


figure 2: exemple d'une aube de turbine.

Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.

- La dynamique de l'écoulement est pilotée principalement par le taux de soufflage M :

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty}$$

- L'écoulement est très complexe, de nombreuses structures cohérentes s'y développent:
 - Tourbillons de Kelvin-Helmholtz (KH)** associés au cisaillement amont.
 - Tourbillon fer à cheval qui entoure le trou en sortie du jet.
 - Tourbillon de sillage** derrière la colonne du jet.
 - Paire de tourbillon contra-rotatifs (CRVP)** qui se développent à la suite de l'enroulement des structures de KH.

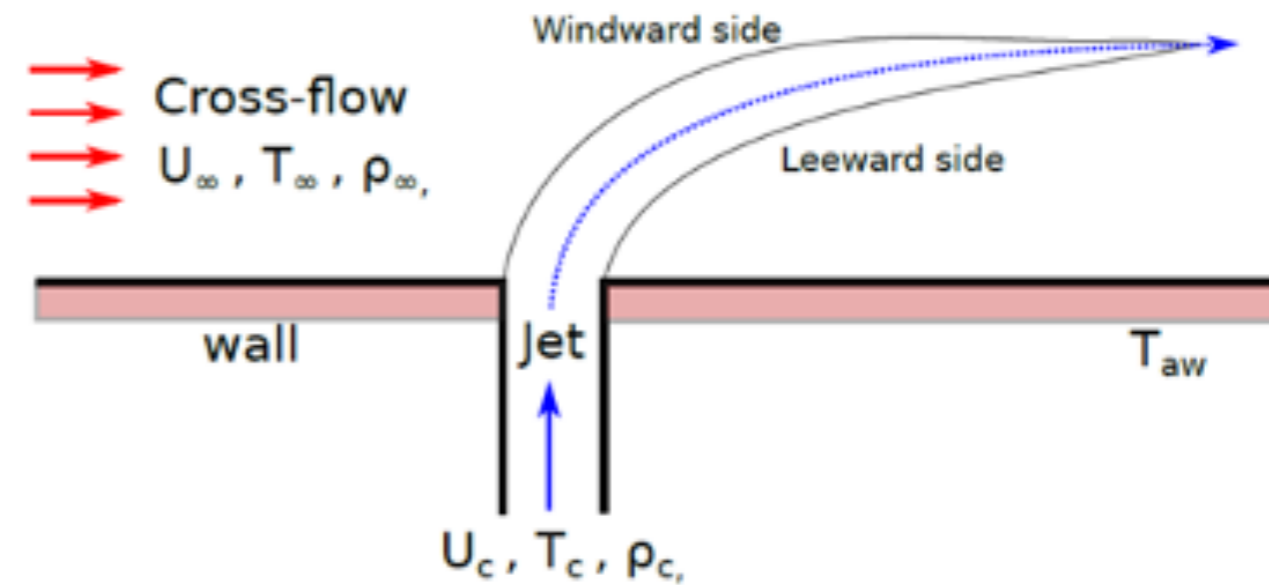


figure 3: définition du jet simple froid débouchant dans un écoulement transverse chaud.

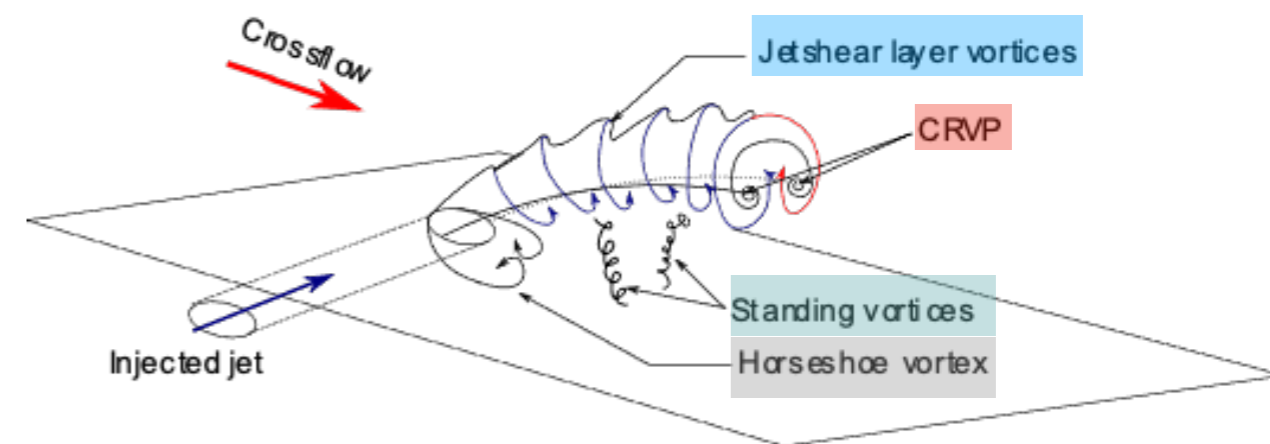


figure 4: description des structures cohérentes du jet débouchant dans un écoulement transverse.

Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.

- L'efficacité de refroidissement est définie par:

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}}$$

où T_{aw} représente la **température adiabatique de paroi**.

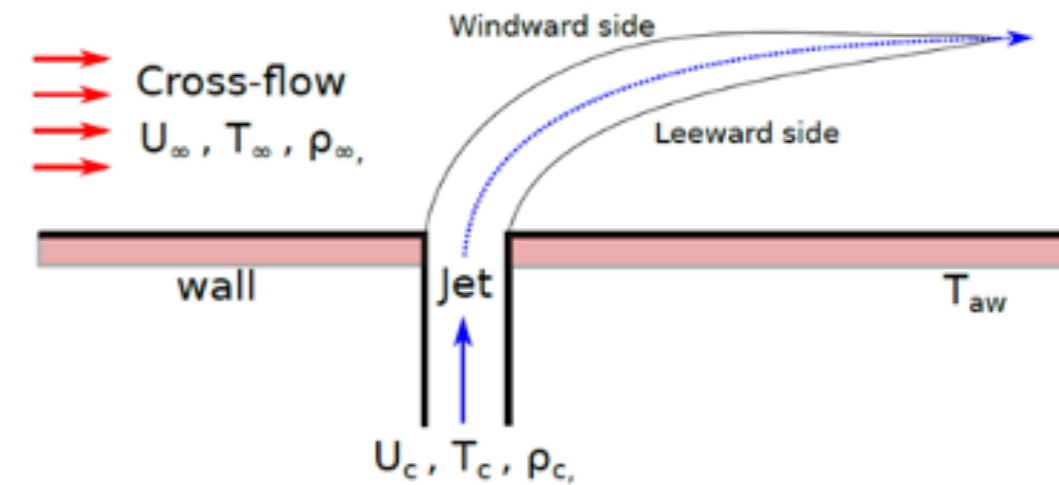


figure 3: définition du jet simple froid débouchant dans un écoulement transverse chaud.

$\eta = 0$ **refroidissement nul**: la température de la paroi est celle du fluide chaud.

$\eta = 1$ **refroidissement parfait**: la température de la paroi est celle du fluide froid.

➡ Il faut **diminuer le mélange entre le fluide chaud et le fluide froid**.

- Plusieurs possibilités de **contrôler le développement des structures KH**:

- Par contrôle acoustique (*Thèse de Q. Sultan, ISAE-ENSMA, 2011*)

- En modifiant la géométrie des trous, **utilisation de trous auxiliaires** (*Thèse d'A. Subramanian, 2022*).

Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.

- L'utilisation de trous « anti vortex » de géométries et de dimensions différentes, appelés trous auxiliaires ont été proposés par Heidmann et al (2008).
- Les auteurs observent une meilleure efficacité de paroi pour certaines géométries, déterminées expérimentalement à partir de thermométrie de paroi (IR, Phosphorescence, Cristaux liquides)
- Ils manquent des mesures de température dans le fluide pour « comprendre » pourquoi la paroi est mieux protégée.
- Développer la métrologie de phosphorescence par ZnO et l'appliquer sur le banc d'essai BATH de l'institut P' ou sont testés des géométries de trous présentés ci dessous.



figure 7: Géométrie des trous testés sur le banc d'essai BATH de l'institut P'.

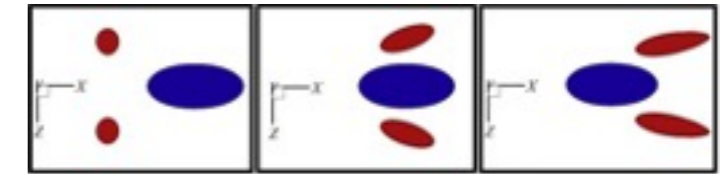


figure 5: exemples de trous « anti vortex » étudiés par Heidmann et al (2008).

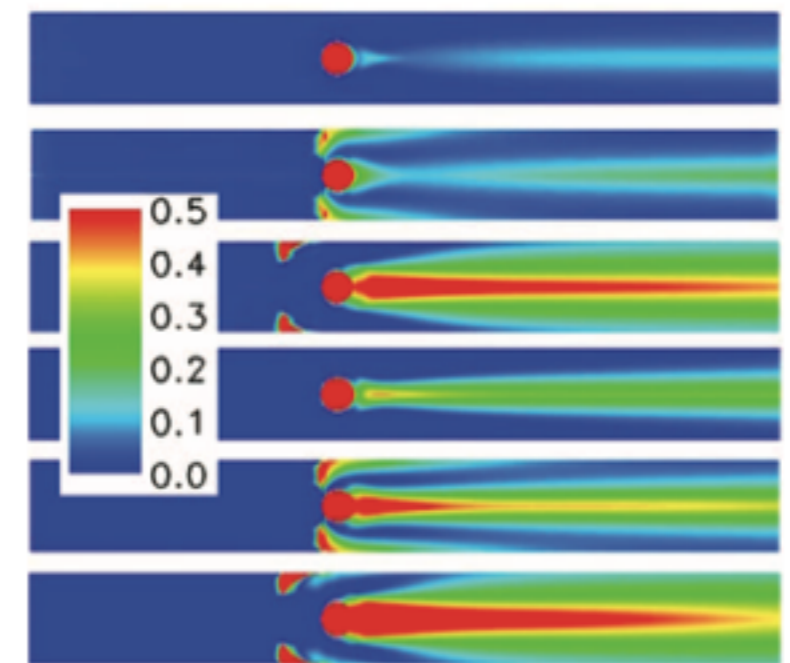


figure 6: distribution des efficacités de refroidissement des trous « anti-vortex » par Heidmann et al (2008).

Références bibliographiques:

Heidmann, James D & Ekkad, Srinath 2008 A novel antivortex turbine film-cooling hole concept. *Journal of turbomachinery* 130 (3).

Plan de présentation

1. Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.
2. Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO
3. Mise en place de la métrologie de mesure de température sur le banc d'essai BATH.
4. Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

- Choix du phosphore: dépend de la température mesurée, du type de fluide et du LASER et caméra intensifiée disponible.

No	Phosphor	τ	Laser excitation (nm)	Spectral emission (nm)	Temperature (K)
1	$Mg_4FeO_6 : Mn^{4+}$	3ms	266,355,385	632-657	700-1050
2	$La_2O_2S : EU^{3+}$	12 μs	355,337	512	300-600
3	$Y_3Al_5O_{12} : Dy^{3+}$	1ms	355	458/497	400-1700
4	$Y_2O_3 : EU^{3+}$	1ms	266,355,532	512,538,624	300-900
5	BAM: EU^{2+}	1 μs	355,375,266,376	460	300-900
6	ZnO: Zn	<1ns	355,266	389,510	300-500
7	$Y_2O_2S : Er^{3+}, Yb^{3+}$	50 μs	980	500-540/540-575	300-600
8	YAG: Pr^{3+}	190 μs	266	484/610	300-750
9	ZnO:Ga	<1ns	355	386	300-600
10	$YVO_4 : EU^{3+}$	300 μs	355	535-592/618-620	650-930

« extreme temperature »

« cold temperature »

- Matériels à disposition:
 - LASER Yag à 266 nm ou 532 nm
 - Caméra Princeton Pimax 2 avec un intensificateur UV.
 - Caméra ANDOR iScmos double trame avec un intensificateur visible.
 - un doubleur d'image optique: Optosplit.
- Choix de l'oxyde de Zinc ZnO, non dopé.
- Une bibliographie riche et précise disponible: Fond et al (2016), Frattina et al (2019)

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

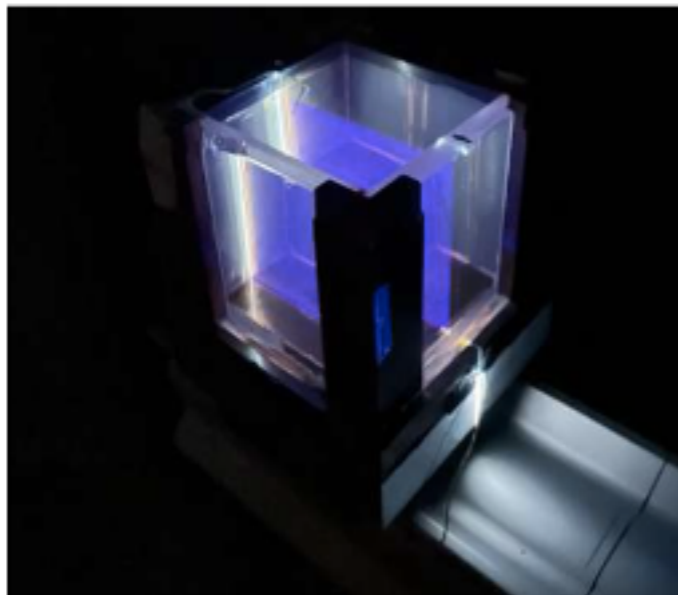
- Equation de l'intensité d'émission de phosphorescence.

$$I(\lambda, x, y, z) \approx I_0(\lambda_0, x, y, z) \sigma(\lambda_0, T) \exp(\chi(x, y, z)d) \chi(x, y, z)$$

Diagram illustrating the equation for phosphorescence intensity $I(\lambda, x, y, z)$ with annotations:

- $I_0(\lambda_0, x, y, z)$: énergie Laser
- $\sigma(\lambda_0, T)$: Section efficace d'interaction rayonnement matière
- $\exp(\chi(x, y, z)d)$: Absorption de Beer-Lambert
- $\chi(x, y, z)$: Concentration en ZnO
- $I(\lambda, x, y, z)$: niveau de gris de l'image

- Vérification expérimentale des paramètres de cette expression en mesurant des spectres d'émission de phosphorescence dans une cellule de calibration, remplie d'eau de température variable.



Laser Tag à 266 nm, nappe de 10 x10 x 0,03 cm³
Durée du pulse Laser: 20 ns.
Spectromètre Ocean Optics USB 2000 (200-1200 nm)

- Etude de l'influence de la concentration.

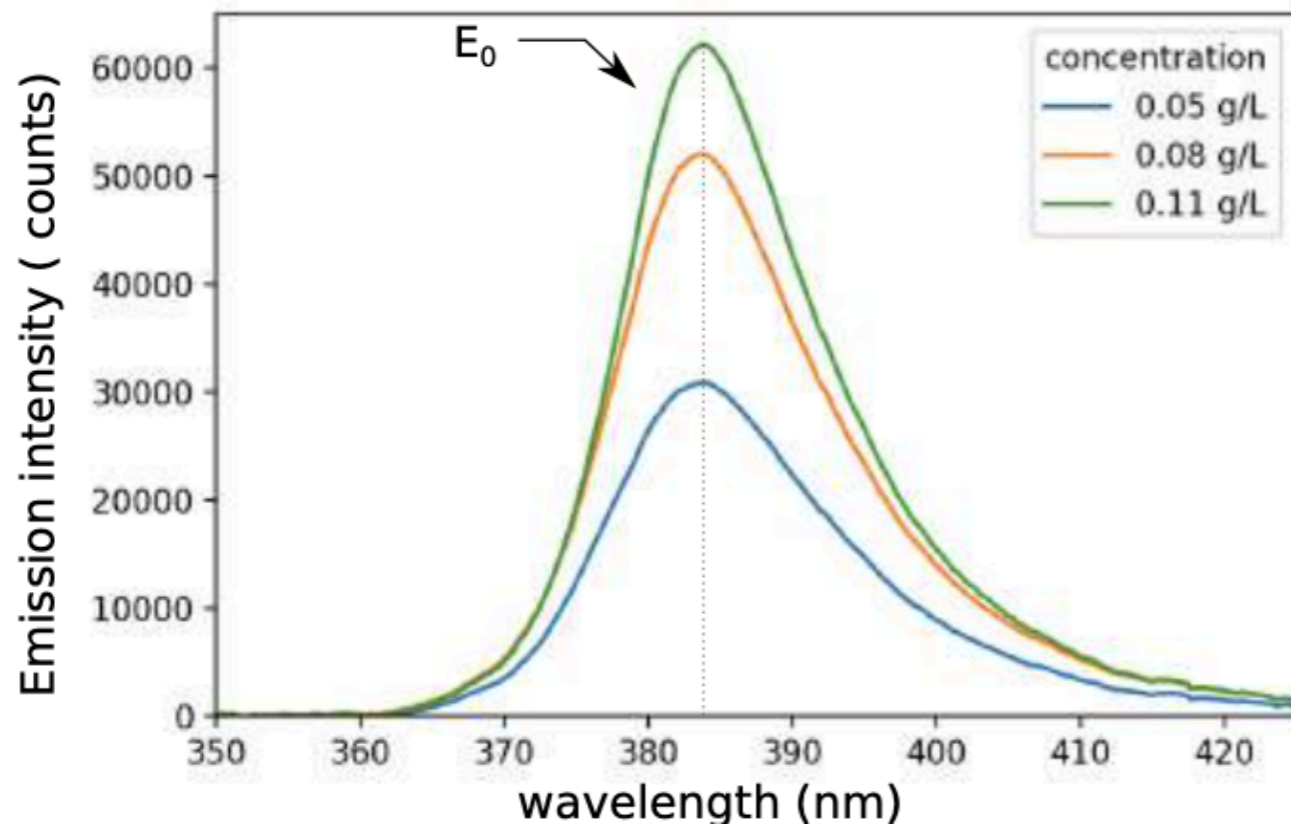


figure 7: spectre d'émission de phosphorescence en fonction de la concentration en ZnO, pour $T=20^\circ\text{C}$.

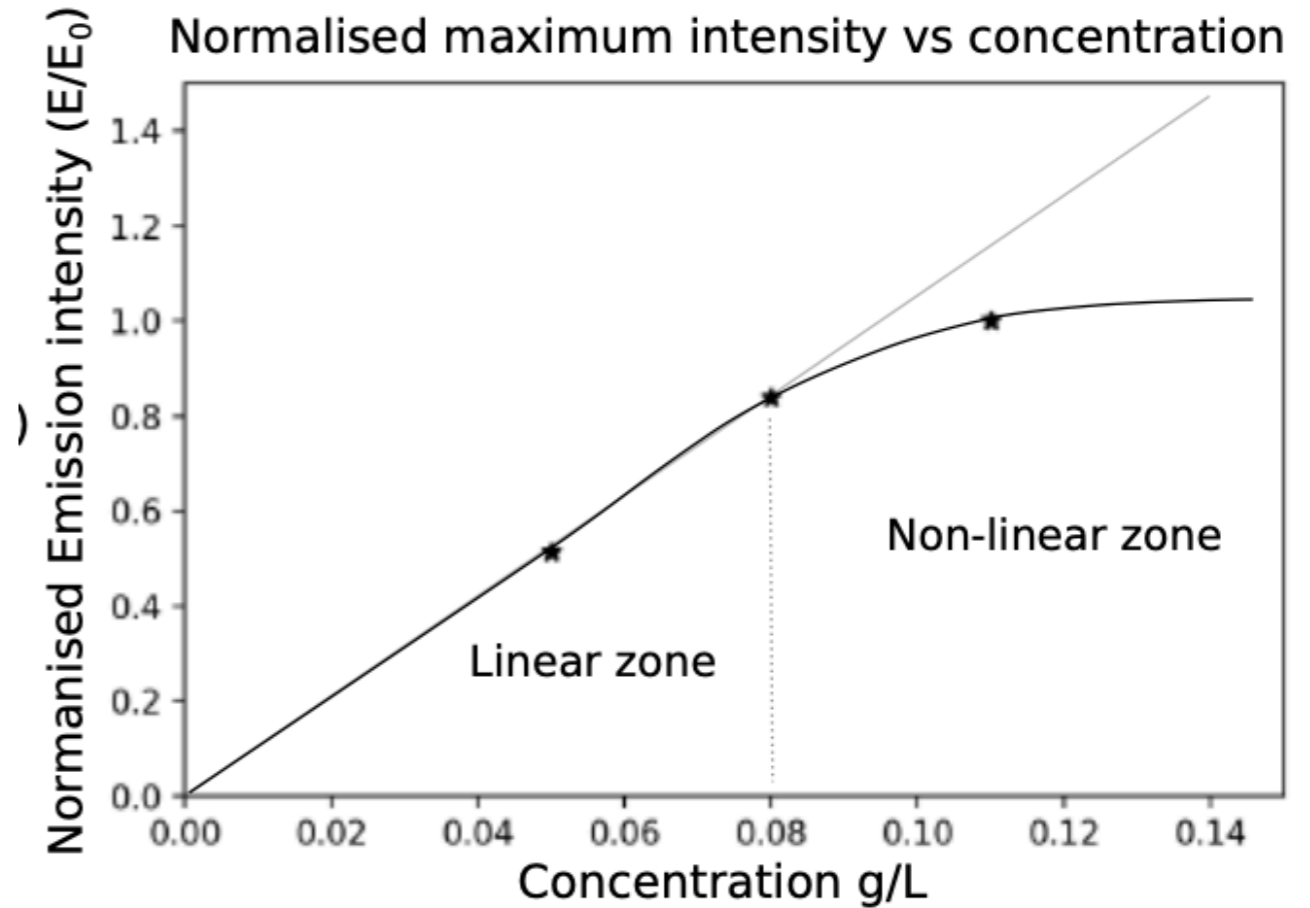


figure 8: Evolution de l'énergie phosphorescée en fonction de la concentration, pour $T=20^\circ\text{C}$.

- L'émission de phosphorescence est une fonction linéaire de la concentration en particules de ZnO si la concentration est inférieure à 0,08 g/mol.

$$I(\lambda, x, y, z) \approx I_0(\lambda_0, x, y, z) \sigma(\lambda_0, T) \exp(\chi(x, y, z)d) \chi(x, y, z)$$

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

- Etude de l'influence de l'énergie Laser

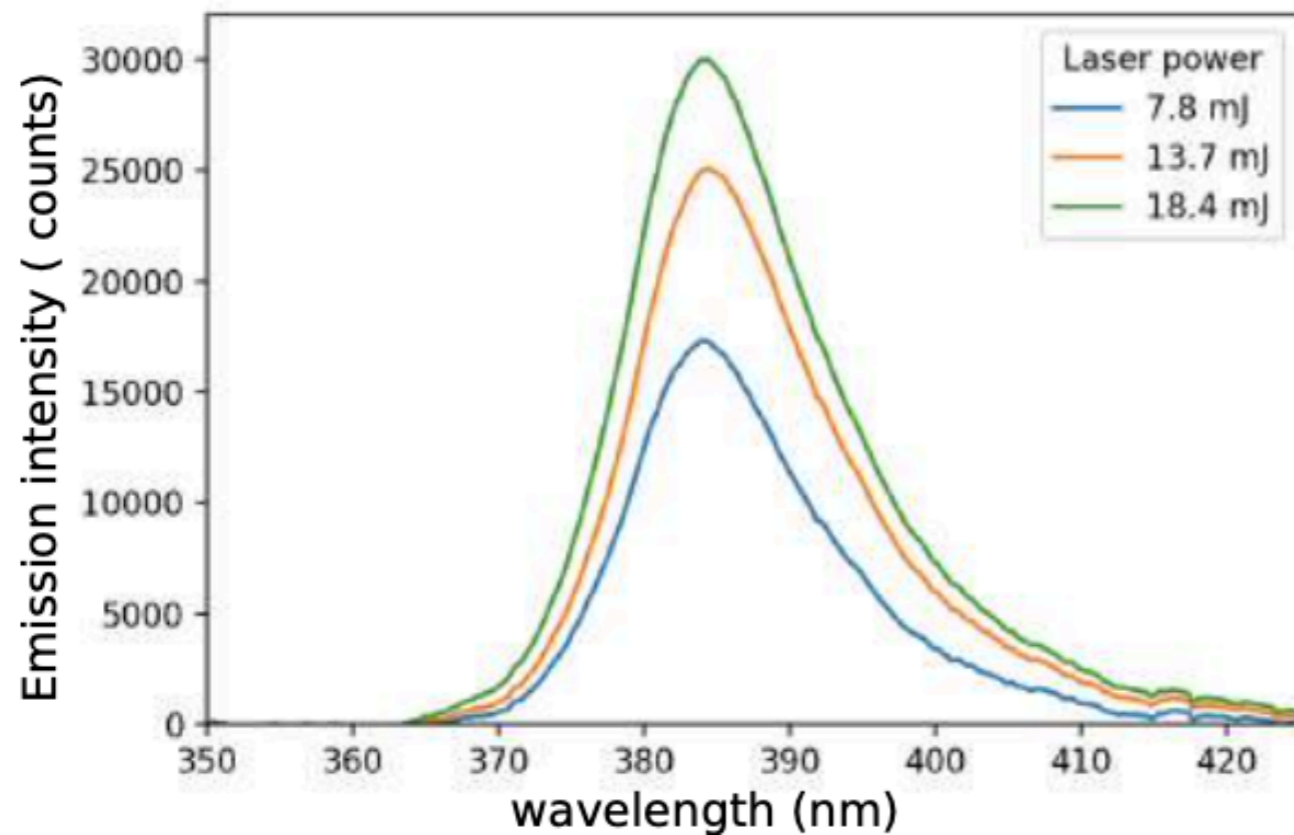


figure 9: spectre d'émission de phosphorescence en fonction de l'énergie LASER, pour $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

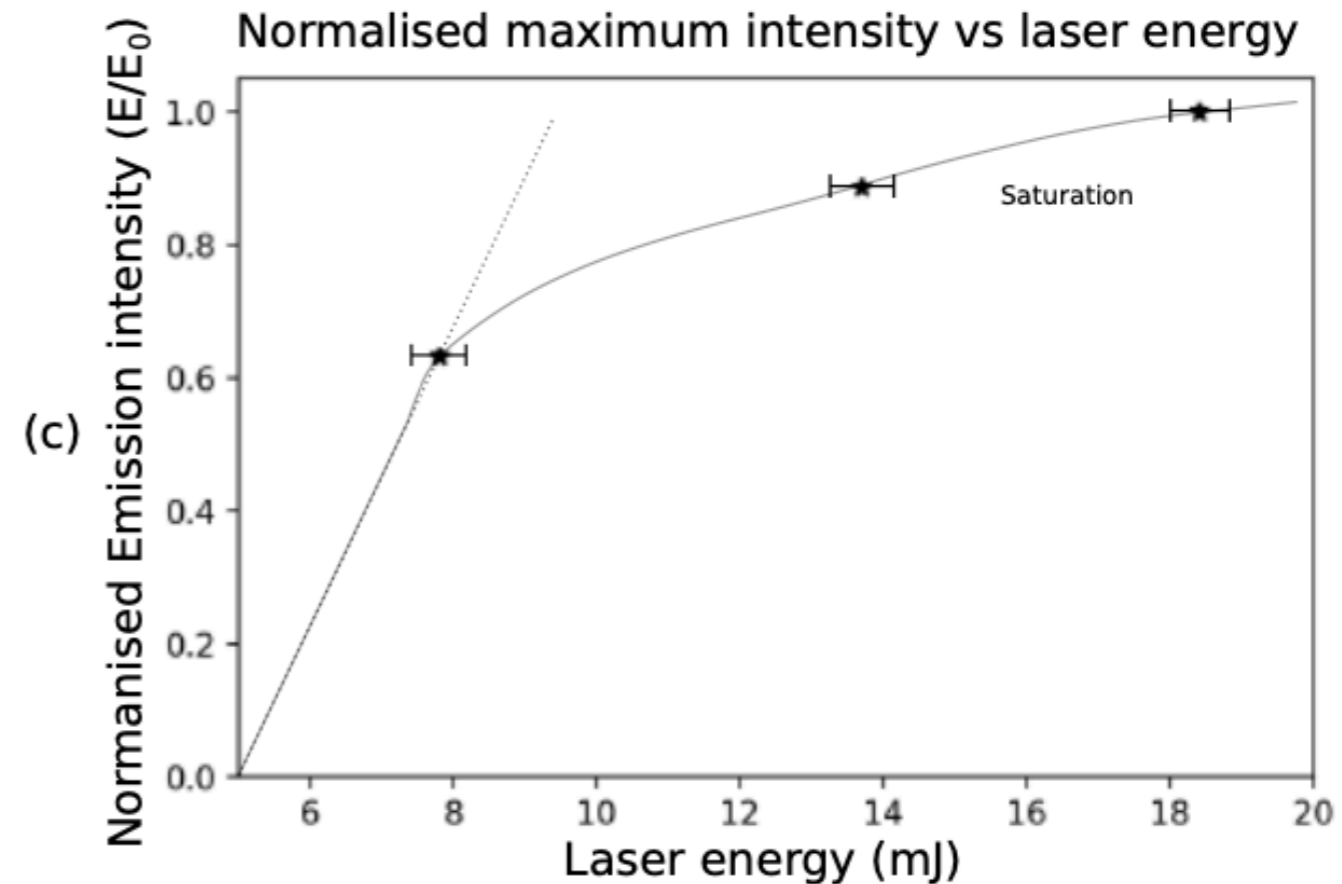


figure 10: Evolution de l'énergie phosphorescée en fonction de l'énergie LASER.

- L'émission de phosphorescence est une fonction linéaire de l'énergie LASER si l'énergie LASER est inférieure à 0,08 g/mol.

$$I(\lambda, x, y, z) \approx I_0(\lambda_0, x, y, z) \sigma(\lambda_0, T) \exp(\chi(x, y, z)d) \chi(x, y, z)$$

- Etude de l'influence de la température

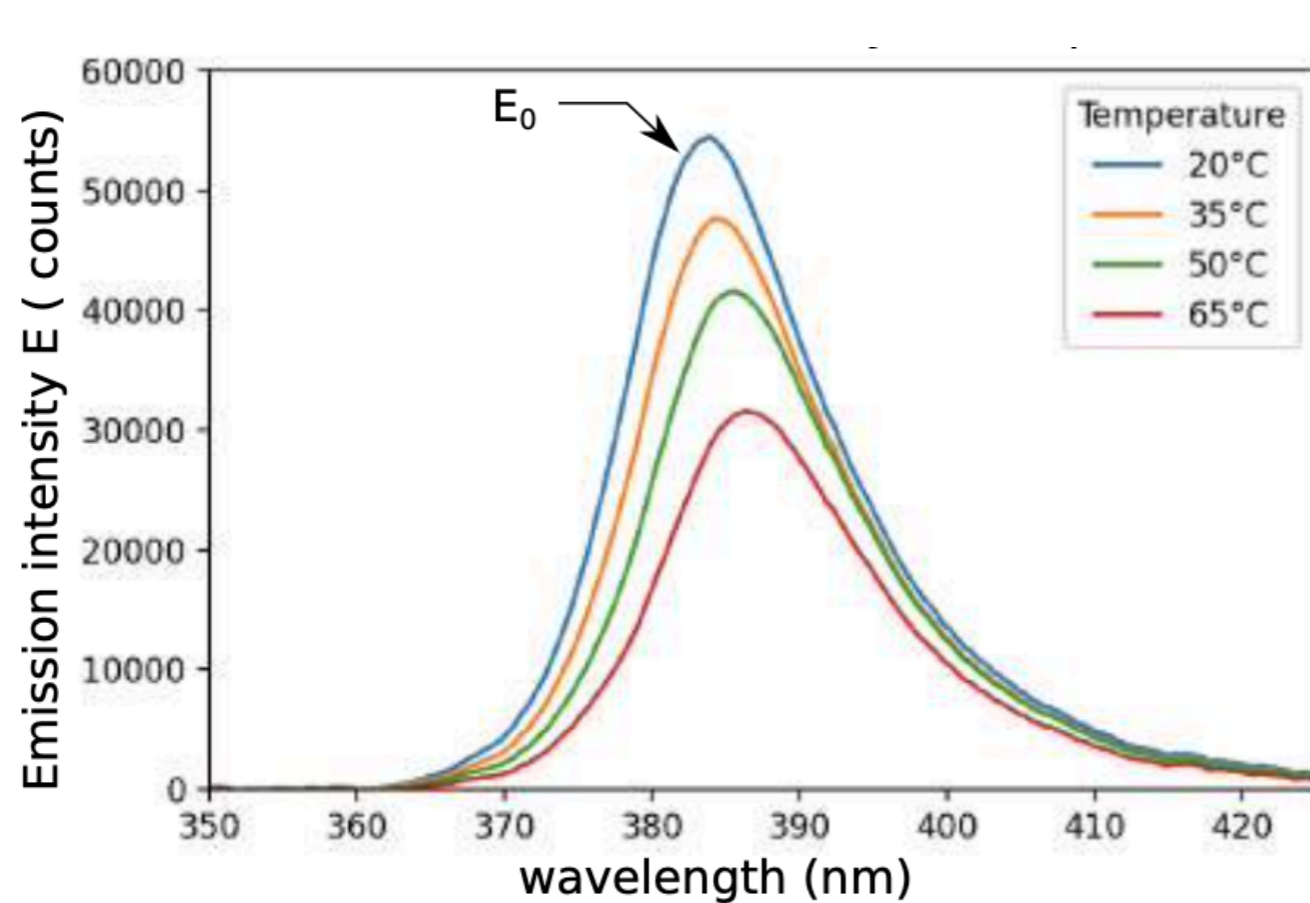


figure 11: spectre d'émission de phosphorescence en fonction de la température, pour $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

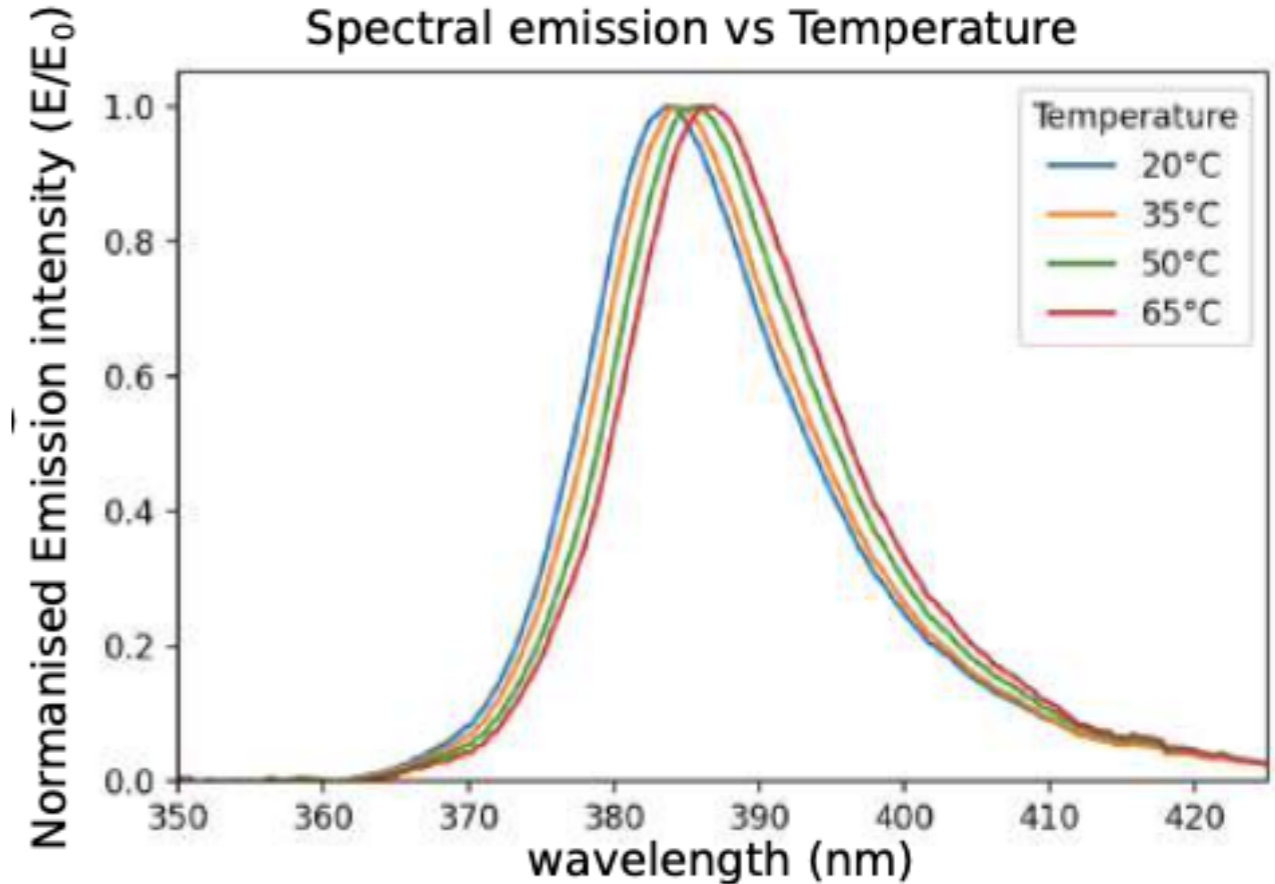


figure 12: spectre adimensionné d'émission de phosphorescence en fonction de la température, pour $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- L'émission de phosphorescence est une fonction non linéaire de la température.
- Le pic d'émission de phosphorescence se décale vers le rouge lorsque la température augmente.
- L'émission totale de phosphorescence décroît en fonction de la température

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

- Méthode de filtrage spectral.
 - localement, dans un écoulement turbulent
 - la concentration d'un traceur varie,
 - la température varie et
 - l'énergie Laser peut fluctuer tir à tir.
 - Utilisation des deux filtres passe-bande centrés sur des longueurs d'onde différentes.

$$R = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_o \sigma(\lambda_1, T) \exp(\chi d) \chi}{I_o \sigma(\lambda_2, T) \exp(\chi d) \chi}$$

$$R(T) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\sigma(\lambda_1, T)}{\sigma(\lambda_2, T)}$$

- Il faut réaliser une calibration in situ.

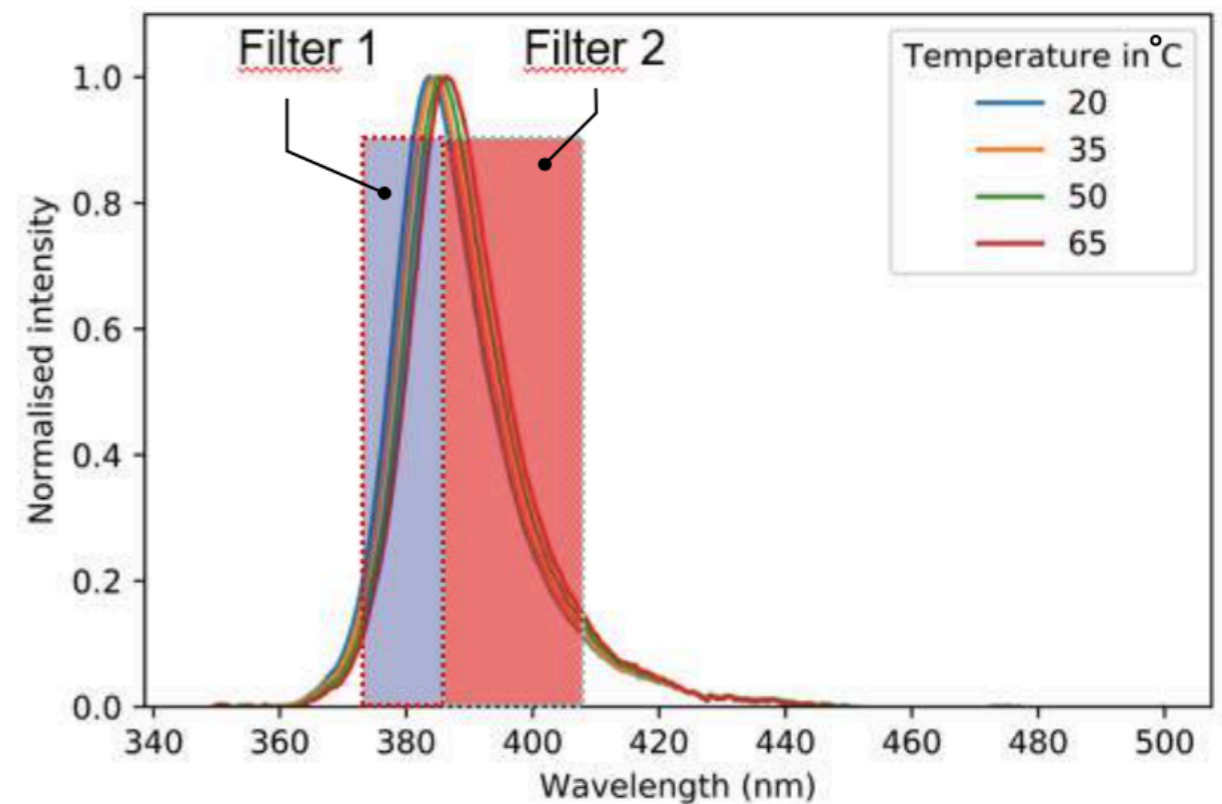
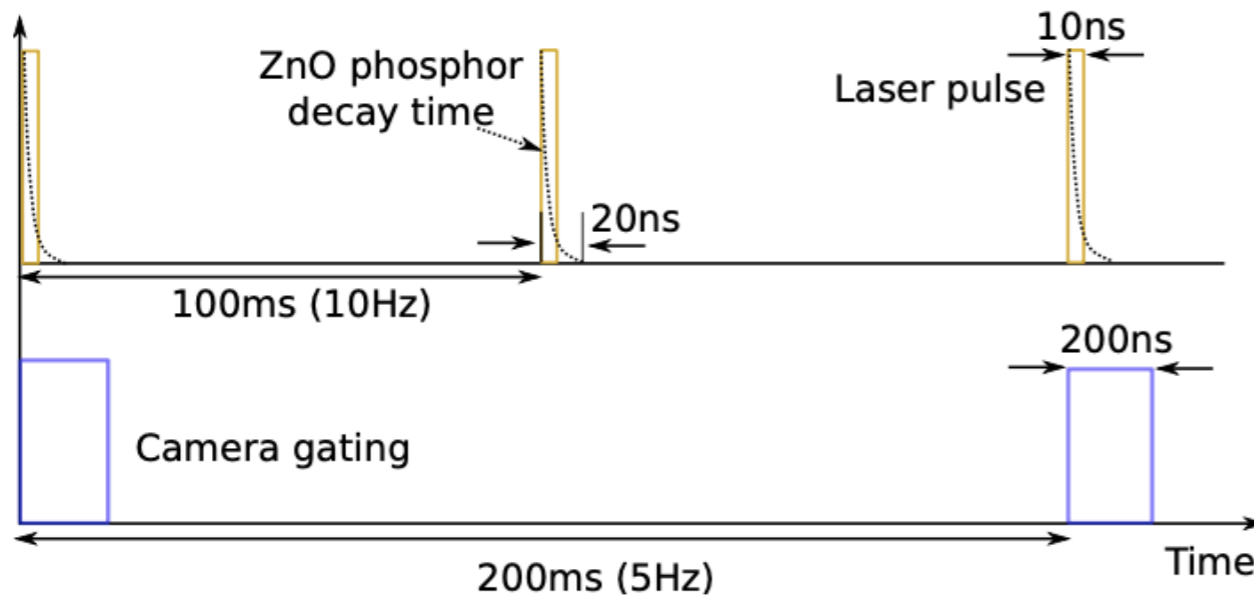


figure 13: choix des filtres passe bandes utilisés pour la mesure de température par phosphorescence de ZnO.

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

- Synchronisation et utilisation d'un doubleur d'image.



$$R(T) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\sigma(\lambda_1, T)}{\sigma(\lambda_2, T)}$$

figure 14: Chronogramme de synchronisation

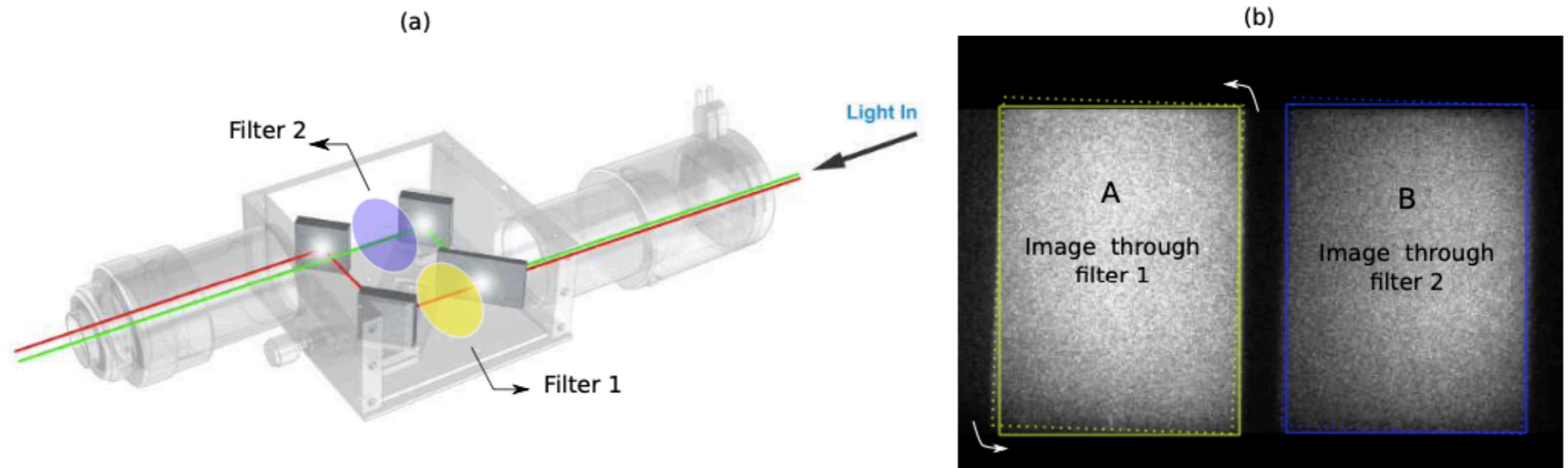


figure 15: Utilisation d'un doubleur d'image, l'Optosplit.

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

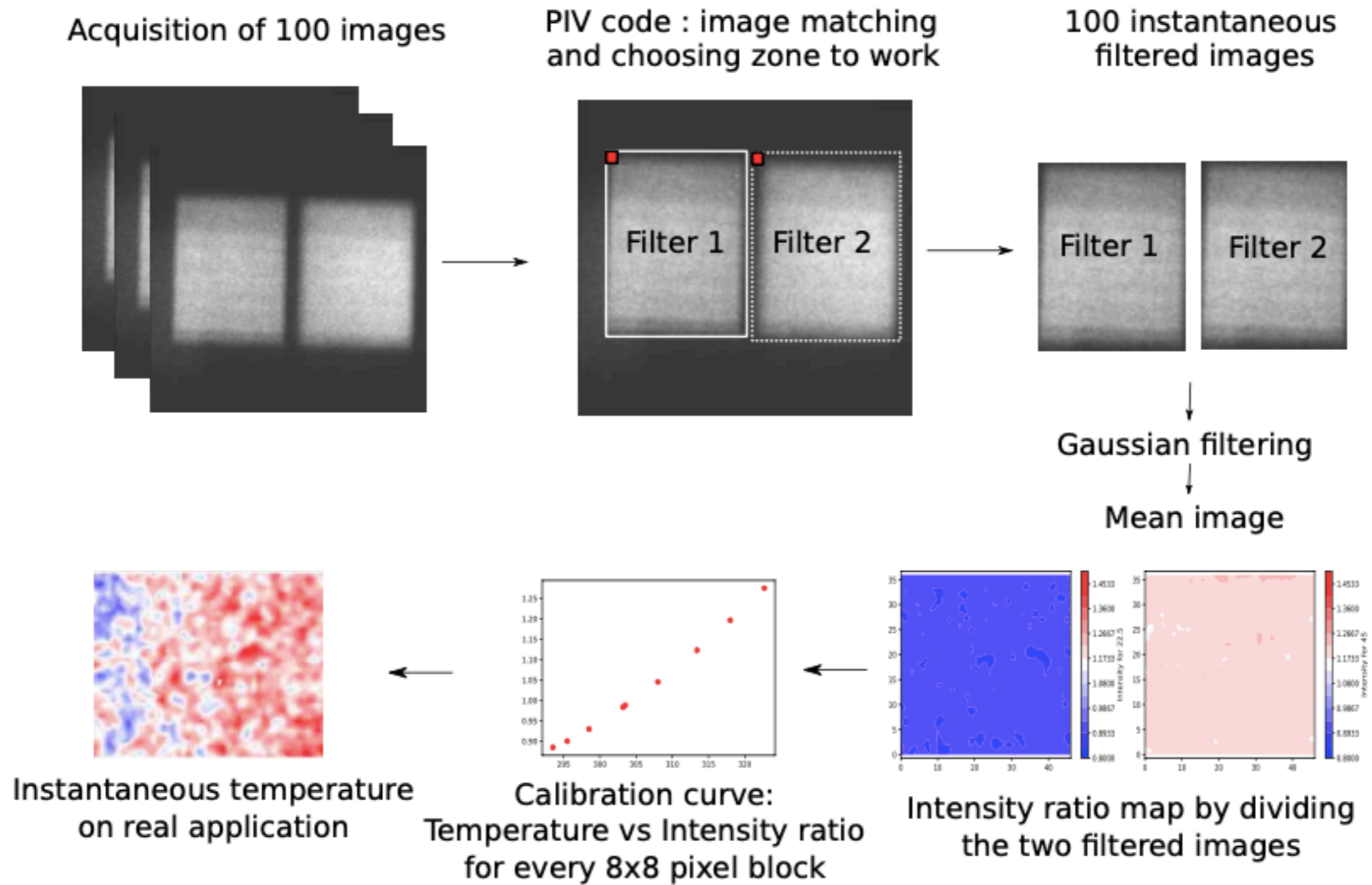


figure 16: Organigramme de la mesure de température.

Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO

- Mesure des températures moyennes dans la cellule de calibration.

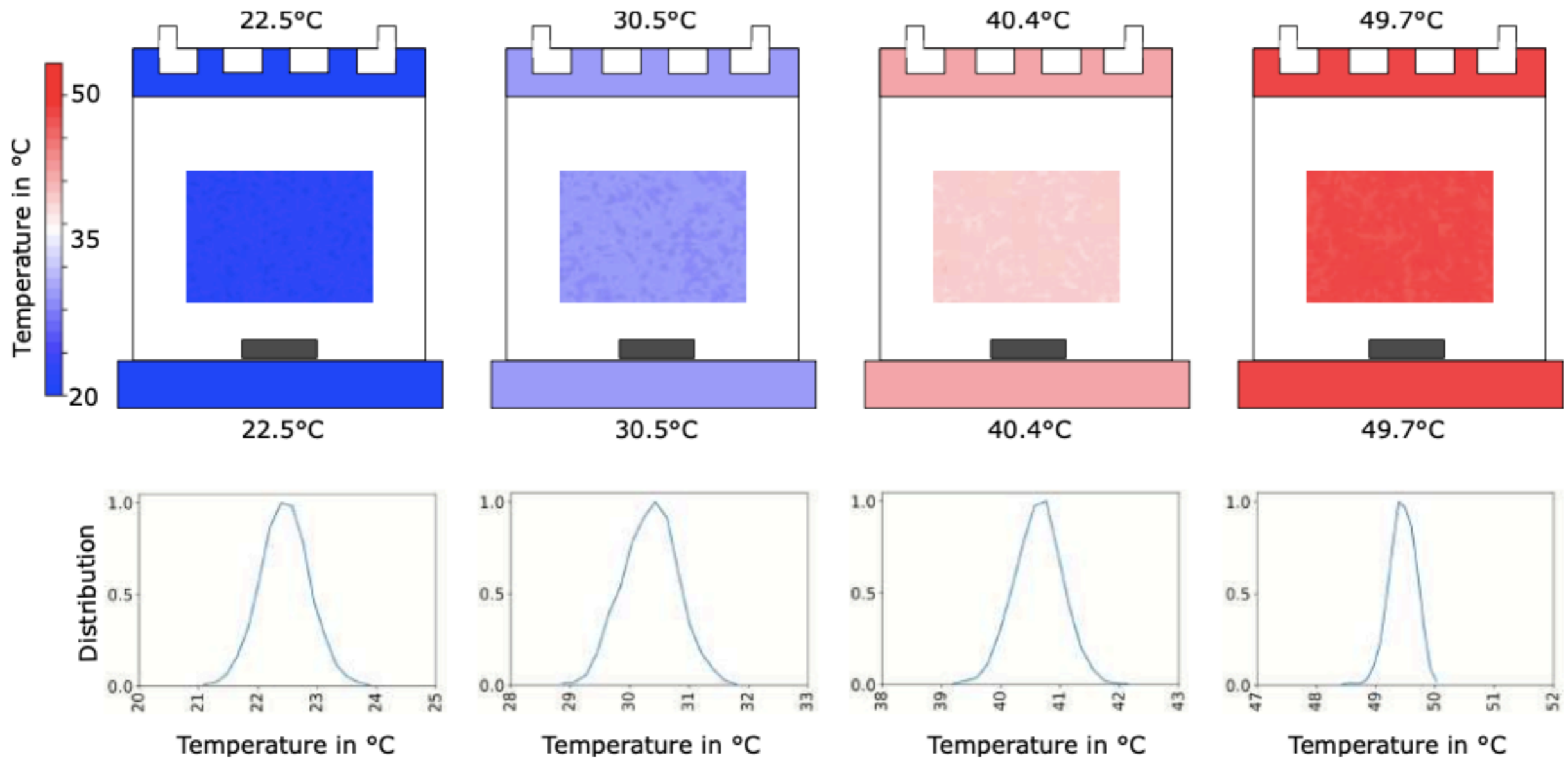


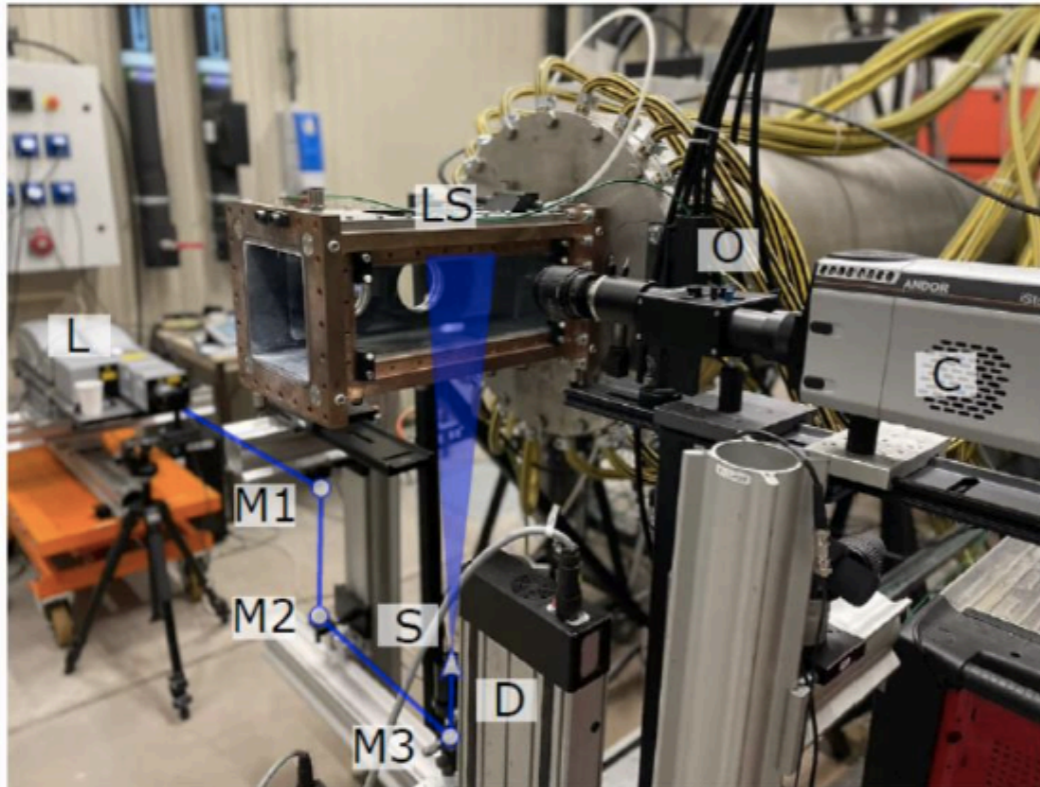
figure 17: Mesure de température moyenne dans la cellule de calibration.

Plan de présentation

1. Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.
2. Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO
3. Mise en place de la métrologie de mesure de température sur le banc d'essai BATH.
4. Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

Mise en place de la métrologie de mesure de température sur le banc d'essai BATH.

- Veine d'essai haute pression et haute température
 $P < 10$ bars et $300\text{ K} < T < 1500\text{ K}$
- débit variable:
 $0,1\text{ kg/s} < Q < 1,5\text{ kg/s}$.



L: Laser, M: Mirror, D: 3-axis displacement
LS: Laser Sheet, C: Camera, O: Optosplit, S: Sheet optics

figure 19: Banc d'essai BATH, institut P'.

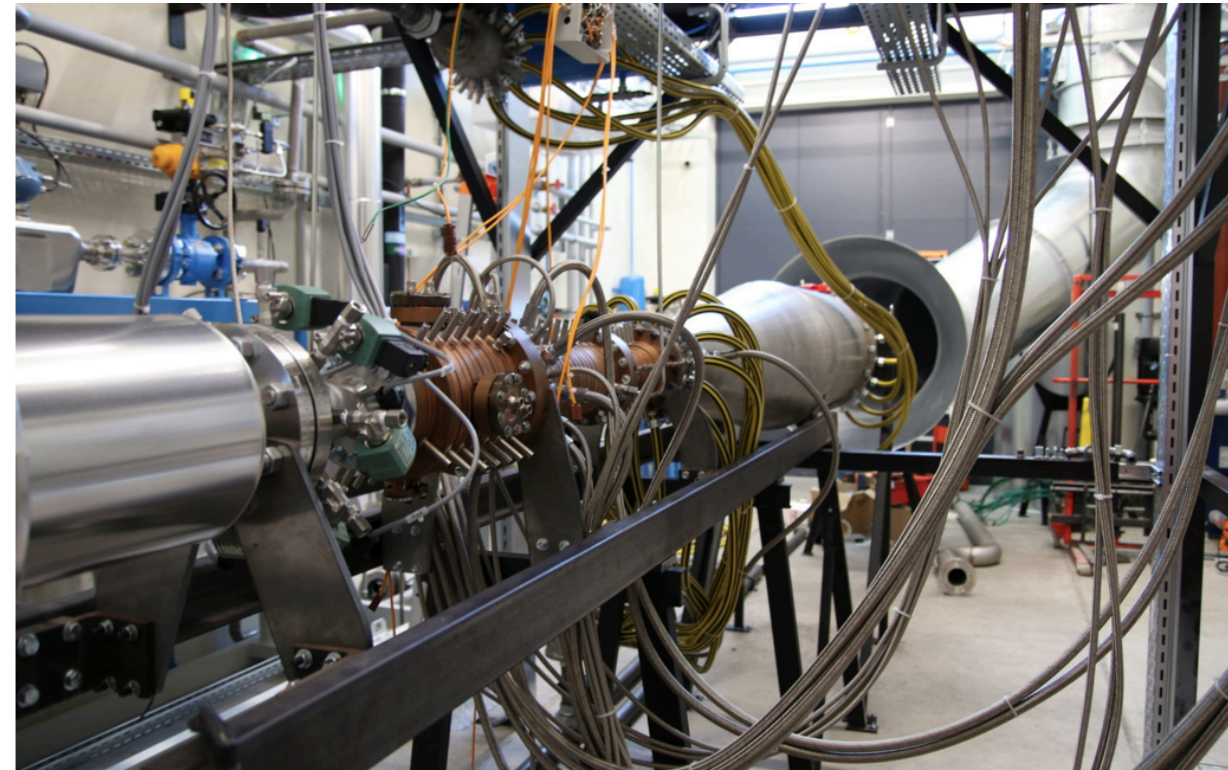


figure 18: Banc d'essai BATH, institut P'.

- Laser Quantel Q450
- Optosplit
- filtre passe-bande:
 - Filtre 1: ET395/25x
 - Filtre 2: AT425/50x
- Caméra Andor iStar Scmos.

- Calibration in situ dans la veine d'essai selon la technique précédemment montrée.

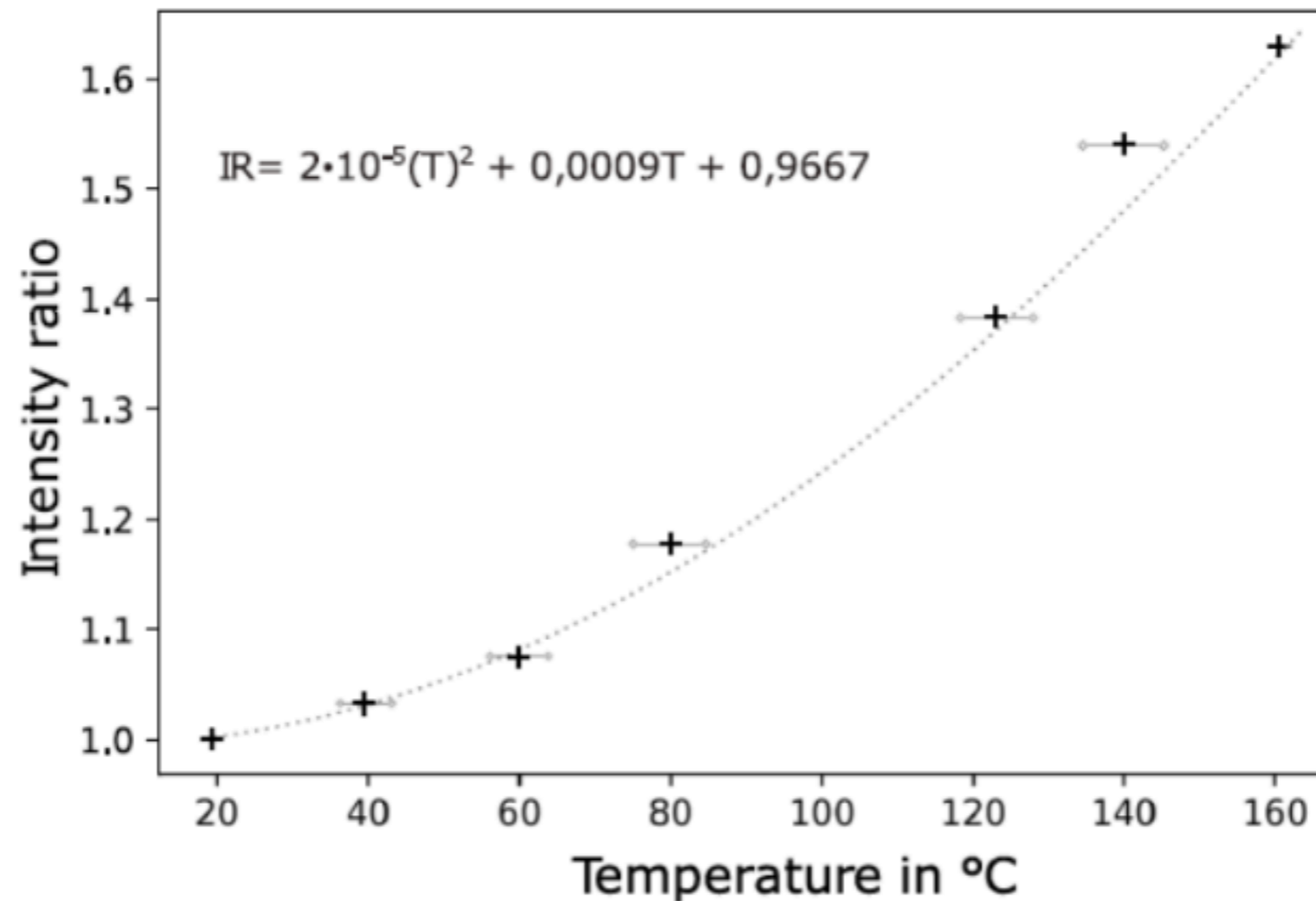


figure 19: Banc d'essai BATH, institut P'.

Plan de présentation

1. Le film de refroidissement, technique utilisée dans les turbines aéronautiques.
2. Phosphorescence Induite par plan Laser sur ZnO
3. Mise en place de la métrologie de mesure de température sur le banc d'essai BATH.
4. Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_\infty U_\infty}$$

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_{jet} - T_\infty}$$

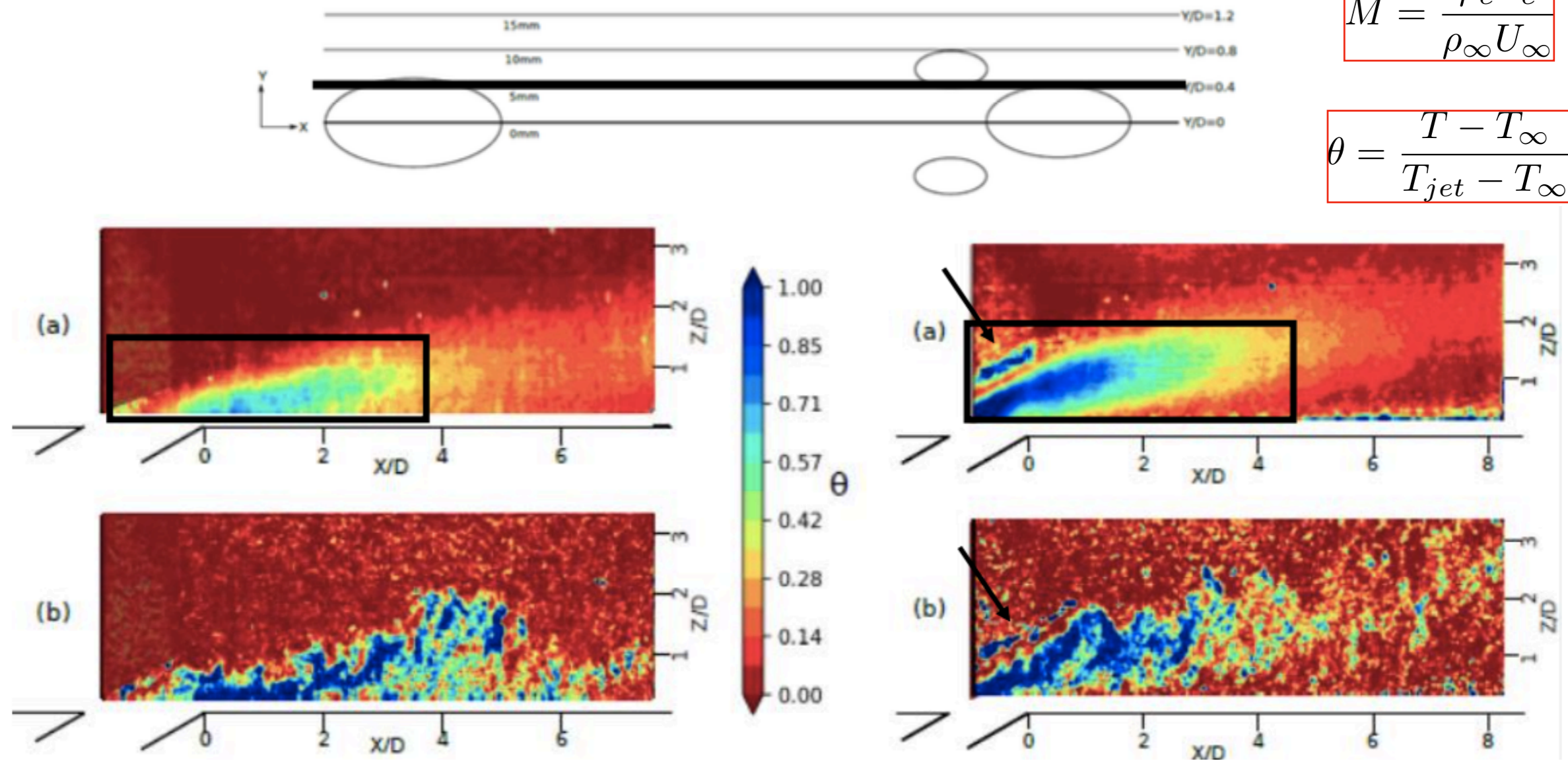


figure 20: Champs moyens et instantanés de température adimensionnée pour $M=3$.

Résultats expérimentaux et comparaison avec des résultats de simulations L.E.S.

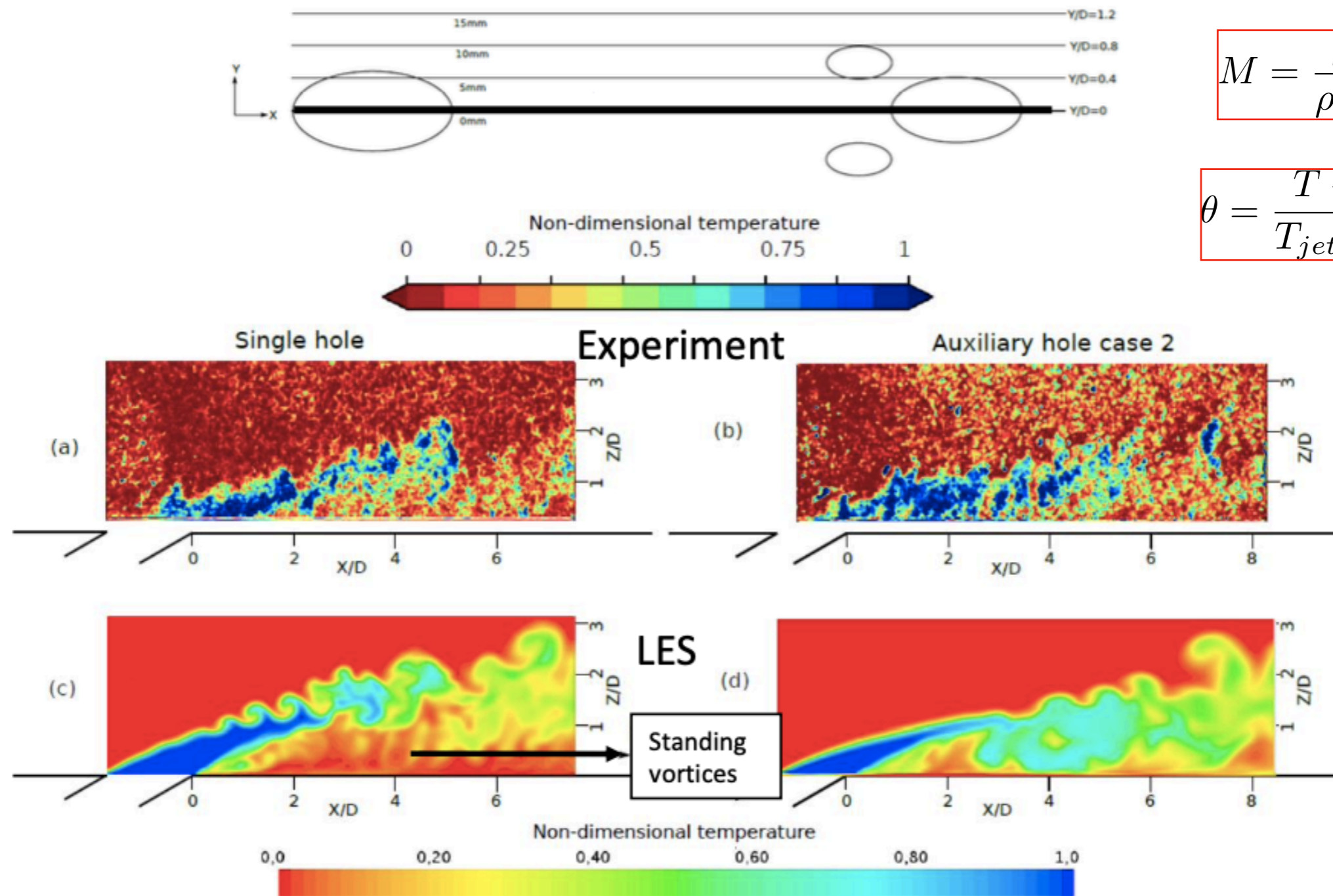


figure 21: Champs instantanés de température adimensionnée pour $M=3$.

- Bon accord entre les résultats expérimentaux et les résultats de référence issus d'une simulation L.E.S.

Conclusions.

- Développement de la métrologie de température par Phosphorescence de ZnO.
- Utilisation des deux filtres passe-bandes et d'un séparateur optique d'images et d'une seule caméra intensifiée.
- Mise en place de la métrologie sur un banc d'essai pour étudier l'influence de la géométrie de trous utilisés pour les films de refroidissement.
- Les résultats expérimentaux permettent de comprendre pourquoi la géométrie proposée est thermiquement plus efficace qu'une géométrie de base.

Perspectives.

- Mise en place et utilisation de phosphore pour mesurer des températures plus importantes.
- Mettre en place la mesure couplée vitesse / température à partir de la double trame possible de la caméra intensifiée.