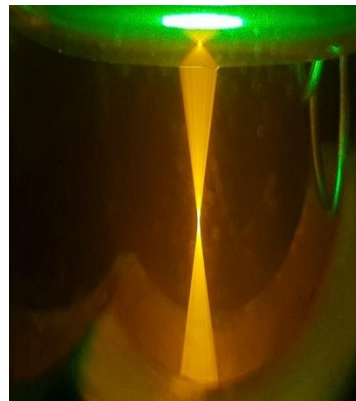


Caractérisation des transferts dans un film ruisselant sur un plan chauffé : Mesures par Fluorescence Induite par Laser

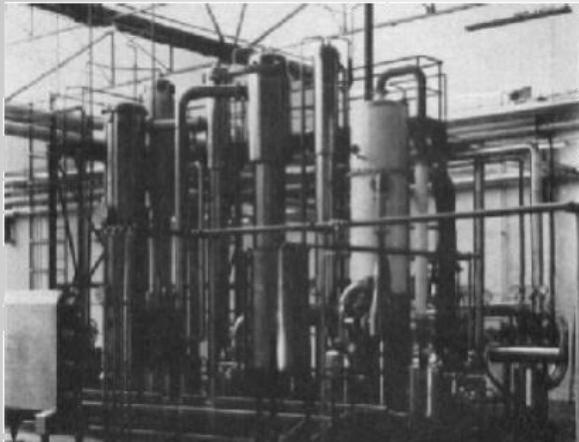
Romain Collignon

Guillaume Castanet, Ophélie Caballina, Fabrice Lemoine

LEMMA, Université de Lorraine, CNRS, Nancy, France



Applications thermiques



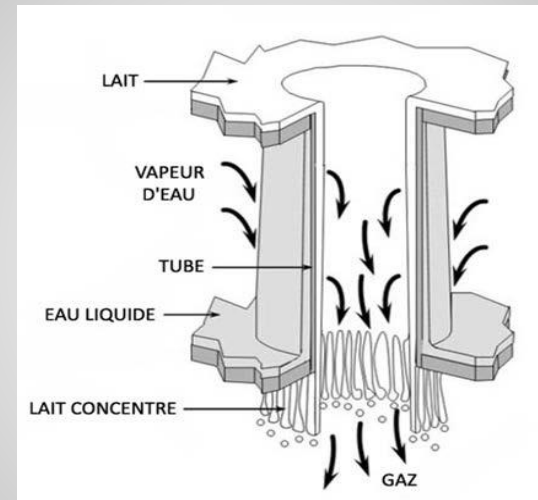
Evaporateurs à films ruisselants



Echangeurs de chaleur

- Optimiser les transferts
- Réduire la quantité de liquide de refroidissement
- Augmenter le rapport surface/volume

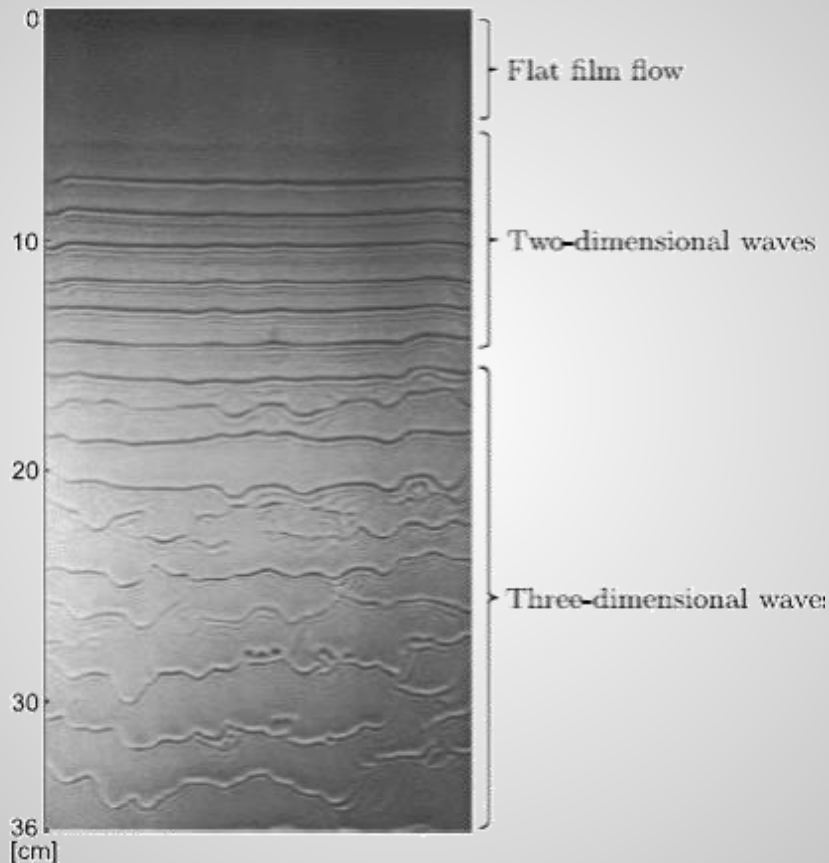
Applications agro-alimentaires



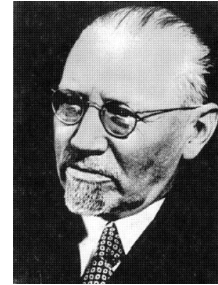
Evaporation de l'eau dans le lait

- Séparer deux espèces
- Optimiser le flux thermique

Instabilités hydrodynamiques de film ruisselant



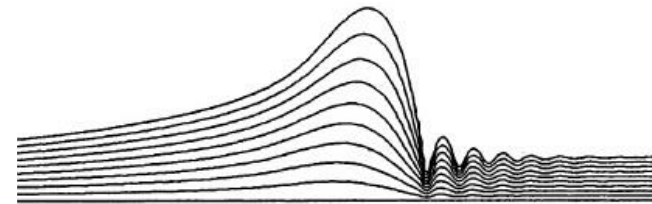
Adapté de C. D. Park and T. Nosoko, 2003
DOI : [10.1002/aic.690491105](https://doi.org/10.1002/aic.690491105)



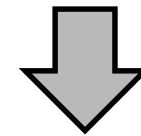
Travaux Pionniers
de W. Nusselt

Modélisation du
film plat en 1923

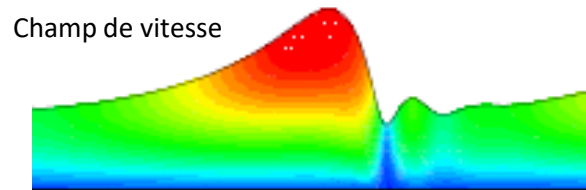
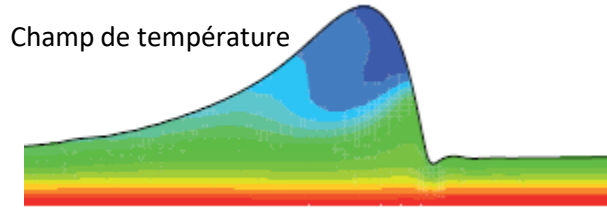
Efforts de recherche soutenus depuis les années 1960



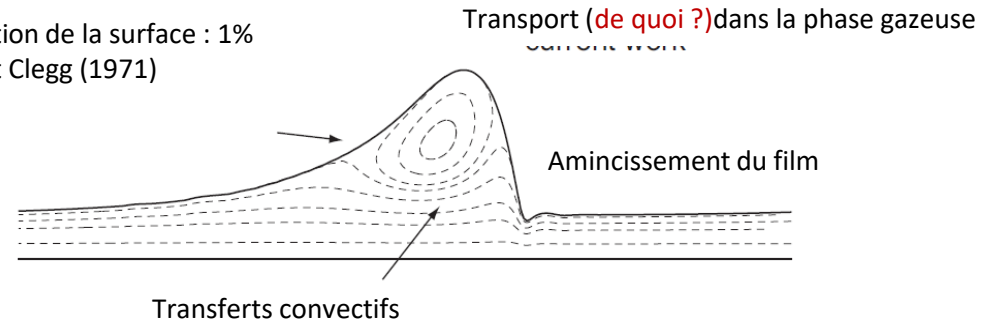
Les instabilités de surface se forment
spontanément à la surface du film



**Augmentation des transferts entre le film et son
milieu par rapport au film plat**

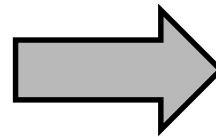


Augmentation de la surface : 1%
Portalski et Clegg (1971)



Adaptés d'une présentation de G.Dietze au GDR Ruissellement et films cisailés 2012

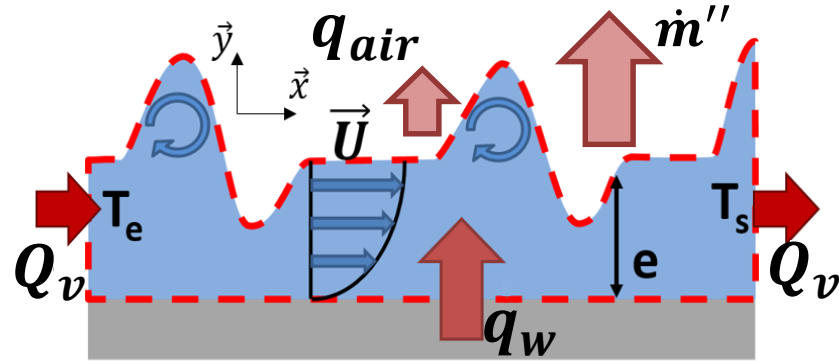
- Nombreux mécanismes influent sur les transferts
- Difficile de les découpler
- Modélisation lourde et complexe



- Fort besoin de résultats expérimentaux
- Manque de données à l'intérieur du film (champ de vitesse, de température, d'espèces, ...)

Caractériser les transferts de chaleur entre le film et une paroi chauffée en régime d'instabilités 2D forcées

Schématisation du problème



En moyenne dans le temps
et par unité de profondeur,

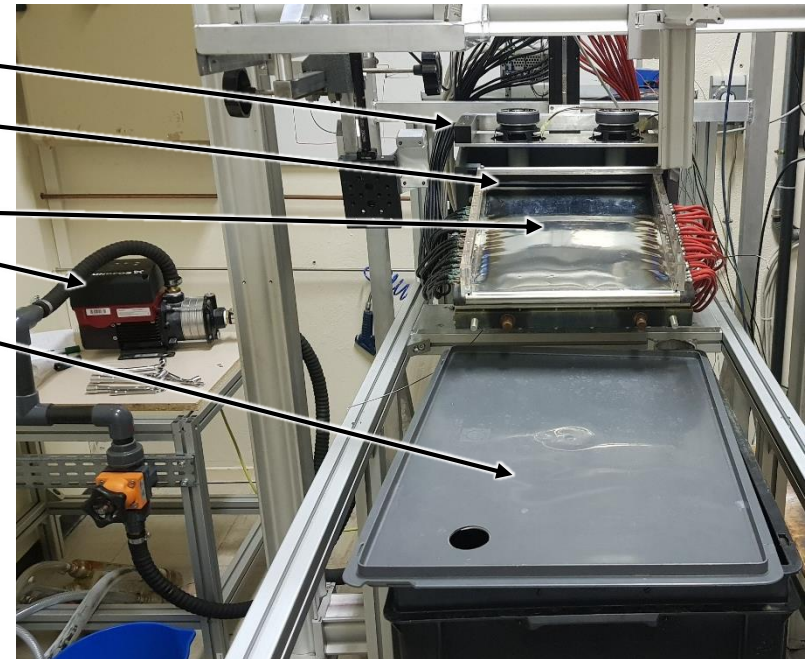
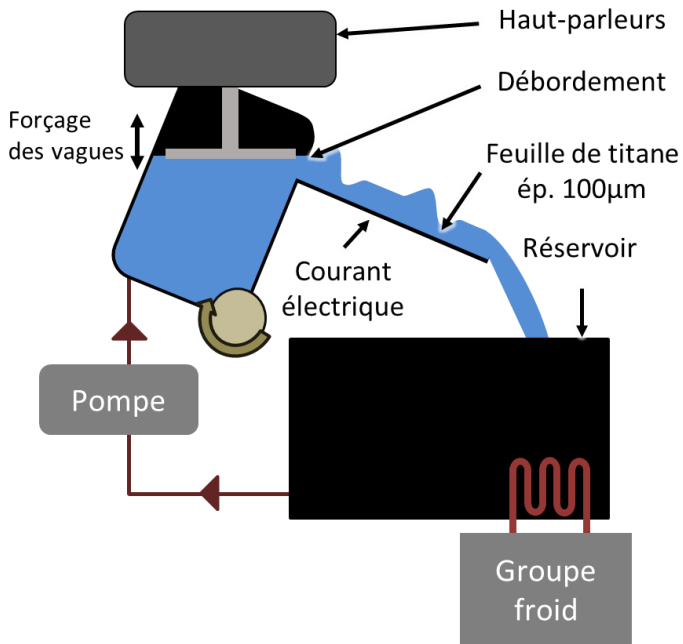
$$\rho C_p Q_v \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + h_e - h_s = q_w + q_{air} + L_v \dot{m}''$$

$$\bar{T} = \frac{\int_0^e U T dy}{\int_0^e U dy}$$

Mesures de
l'épaisseur, la température et la ~~vitesse~~ du fluide

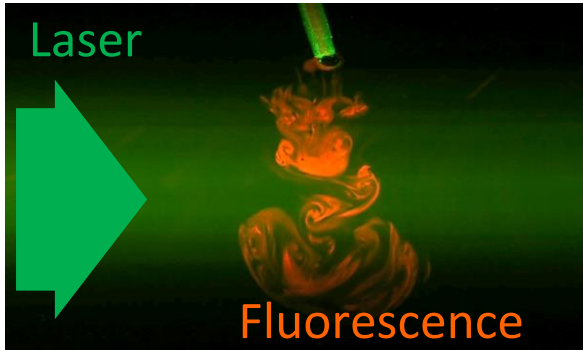
Imagerie Confocale
Chromatique (CCI)

Fluorescence Induite
par Laser (LIF)



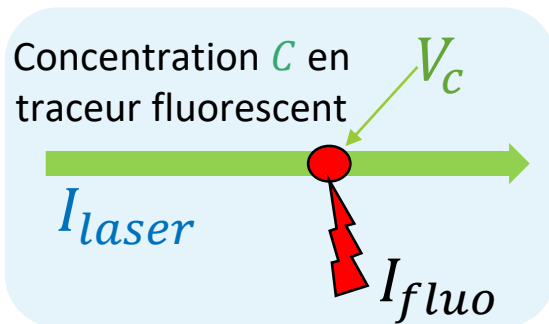
Contrôle indépendant de différents paramètres

- Débit volumique de liquide (0 – 10 L/min)
- Forçage des instabilités de surface (0 – 10 Hz)
- Inclinaison de la paroi (0 – 10°)
- Flux de chaleur à la paroi (0 – $2,5 \cdot 10^4$ W/m²)



Principe de la LIF

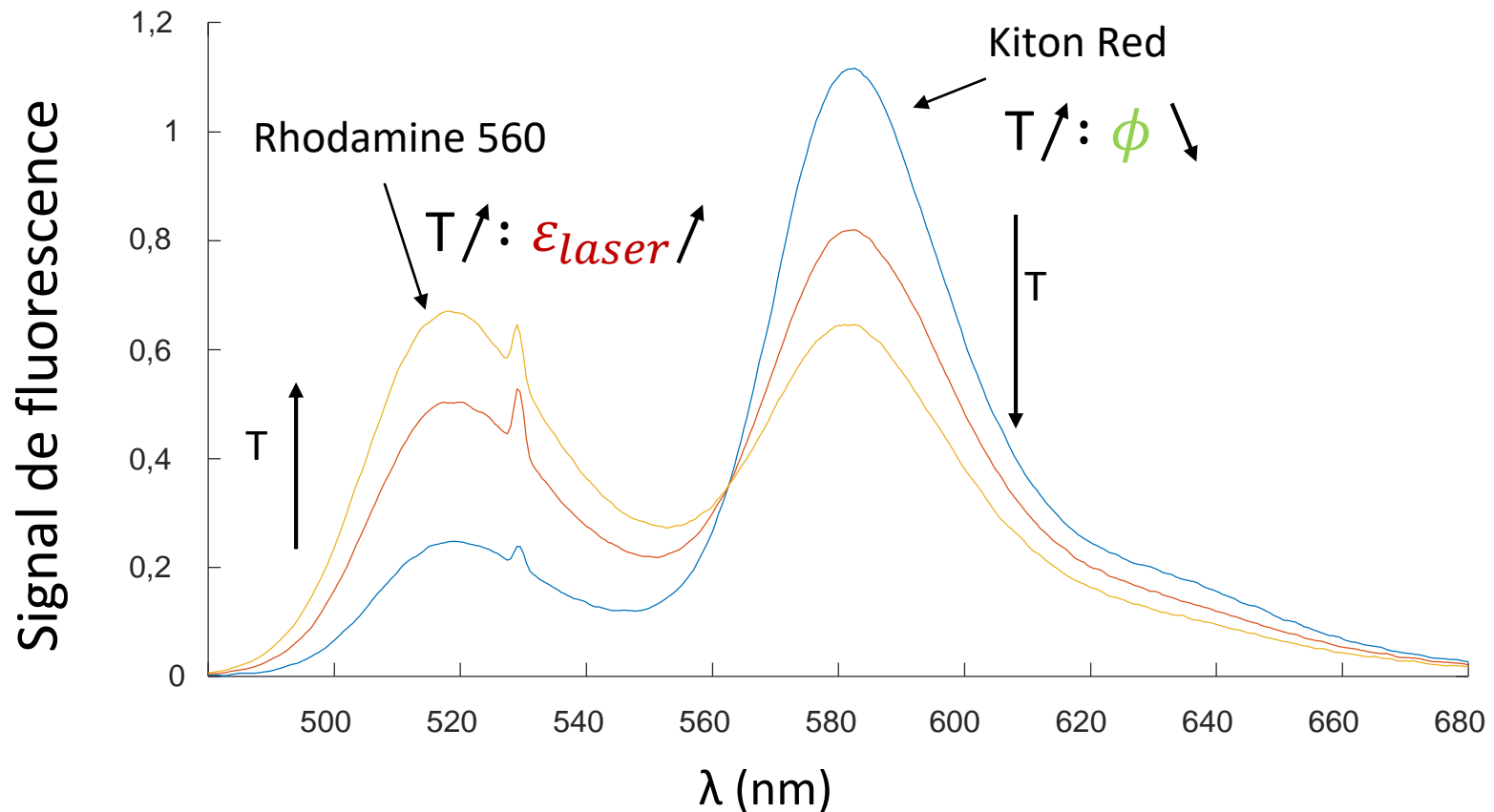
- Ensemencement par un colorant fluorescent
- Excitation par un **rayonnement** laser
- Mesure de l'émission de fluorescence du colorant



Modèle de l'intensité de fluorescence

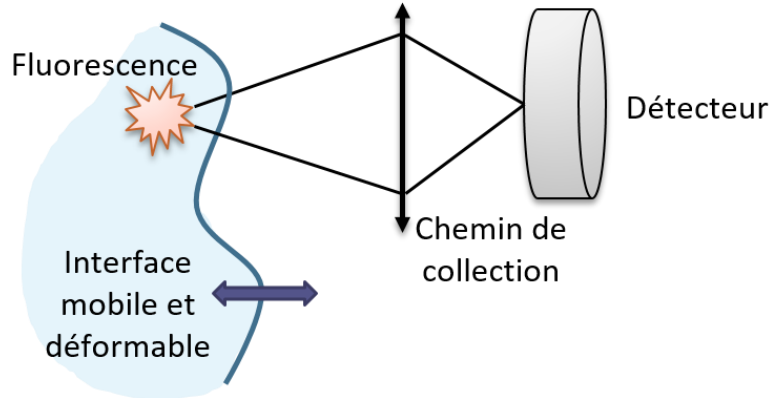
$$I_{fluo}(T) \propto C V_c I_{laser} \epsilon_{laser} \phi$$

- C : Concentration en colorant
- V_c : Volume de collection de la fluorescence
- I_{laser} : Intensité laser incidente à V_c
- ϵ_{laser} : Coefficient d'absorption à la longueur d'onde du laser
- ϕ : Rendement quantique de fluorescence



ϵ_{laser} et ϕ dépendent de la température, propre à chaque colorant

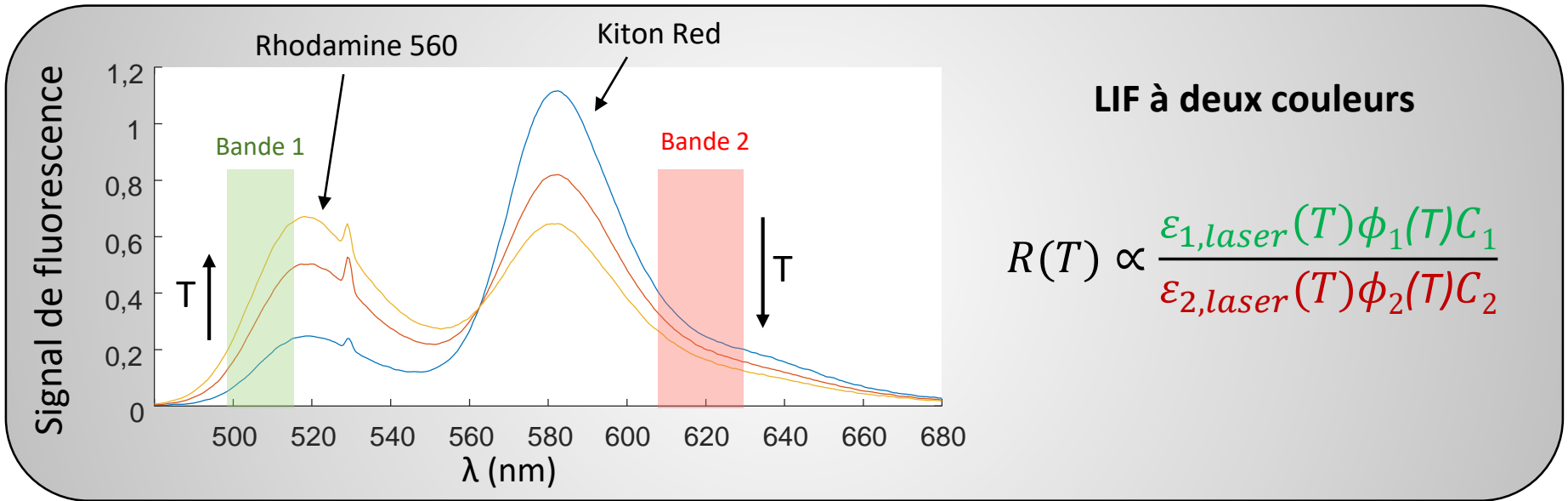
Problème des interfaces mobiles



Modèle de l'intensité de fluorescence

$$I_{fluor}(T) \propto C V_c I_{laser} \epsilon_{laser}(T) \phi(T)$$

- Variation de la transmission de laser
- Variation de la transmission de fluorescence



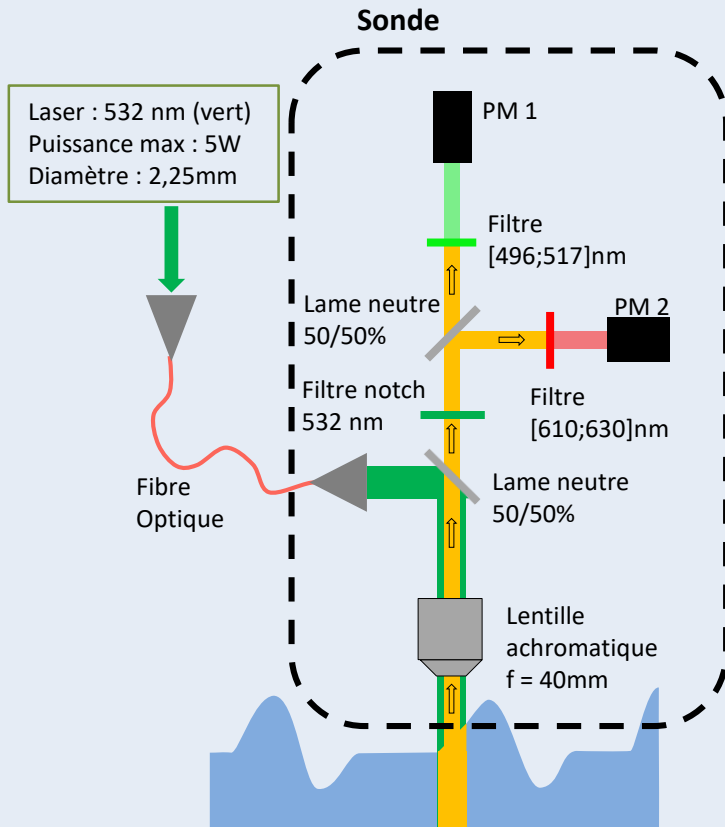
LIF à deux couleurs

$$R(T) \propto \frac{\epsilon_{1,laser}(T) \phi_1(T) C_1}{\epsilon_{2,laser}(T) \phi_2(T) C_2}$$

Dispositif expérimental LIF

Température dans le film liquide

2c μ LIF : Microscopie de fluorescence induite par laser à deux couleurs



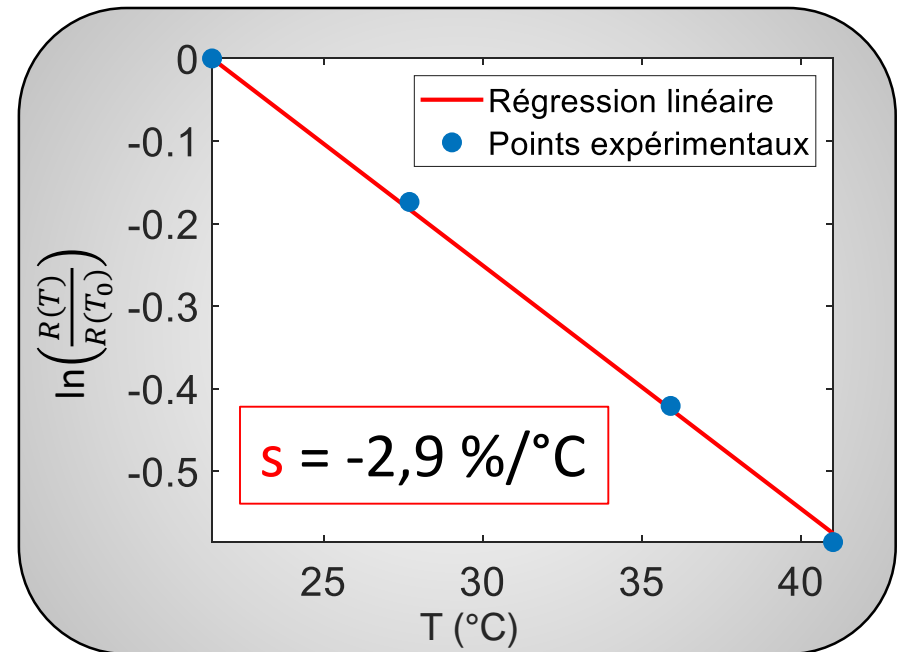
Mesure de l'épaisseur (δ) et de la température moyenne (T) dans l'épaisseur

$$I_{fluor}(T) \propto CV_c I_{laser} \epsilon_{laser}(T) \phi(T)$$

On définit la **sensibilité** de mesure

$$\frac{R(T)}{R(T_0)} = e^{s(T-T_0)}$$

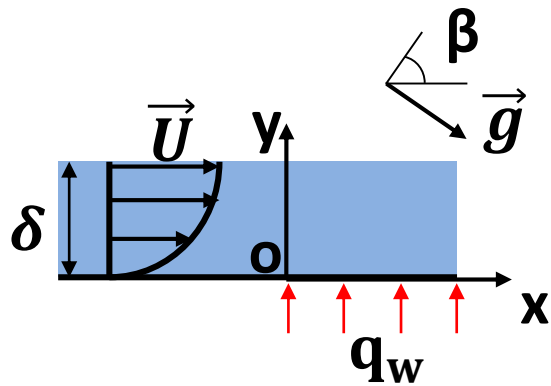
$$\ln\left(\frac{R(T)}{R(T_0)}\right) = s(T - T_0)$$



Etude expérimentale

Intensification
des transferts

Comportement
des vagues



Equations de Navier-Stokes et de conservation

$$\overline{U}(x, y) = \frac{g \sin(\beta) \delta^2}{2\nu} \left(\frac{2y}{\delta} - \frac{y^2}{\delta^2} \right) \vec{x} \quad \overline{U} \propto Re \beta$$

$$Re = \Gamma / \nu \quad \delta \propto (Re / \beta)^{1/3}$$

En posant les grandeurs adimensionnées

$$x^* = \frac{x}{Pe \delta} \quad y^* = \frac{y}{\delta} \quad \theta = \frac{T - T_{(x=0)}}{q_w \frac{\delta}{\lambda}}$$

- q_w : Densité de flux de chaleur pariétal
- δ : Epaisseur du film fluide
- λ : Conductivité thermique du fluide
- β : Angle d'inclinaison
- g : accélération de la gravité
- ν : viscosité cinématique du fluide
- T : Température
- Re : nombre de Reynolds
- Γ : débit volumique par unité de largeur
- Pe : Nombre de Peclet

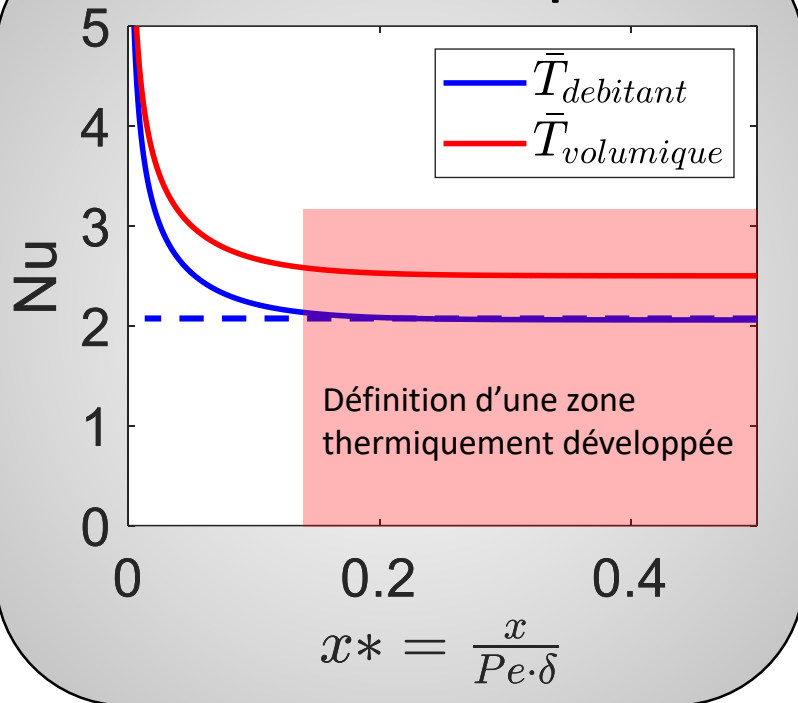
Couplage à l'équation de la chaleur

$$(2y^* - y^{*2}) \frac{\partial \theta}{\partial x^*} = \frac{\partial \theta}{\partial y^*}$$

Caractérisation du transfert

$$Nu = \frac{q_w / \Delta T}{\lambda / \delta}$$

Théorie du film plat



Définitions de \bar{T}

$$\overline{T}_{deb} = \frac{\int_0^e U T dy}{\int_0^e U dy} \quad \overline{T}_{vol} = \int_0^e T dy$$

En se plaçant dans la zone développée,
On peut comparer les Nu avec et sans vagues

En pratique, la comparaison est complexe

Le flux de chaleur pariétal induit des effets thermo-capillaires



Sans Vague

En chauffe

Avec Vagues

Etudier l'effet des vagues sur les transferts entre fluide et paroi

Caractérisation du transfert

$$Nu = \frac{q_w / \Delta T}{\lambda / \delta}$$

Grandeurs mesurées

Epaisseur de film δ

LIF

Température du film T

LIF

Température de paroi

Thermocouples

On fixe

$$q_w = 1,26 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$$

Re	β (°)	f (Hz)
140 - 200 - 260	2 - 6 - 10	2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10

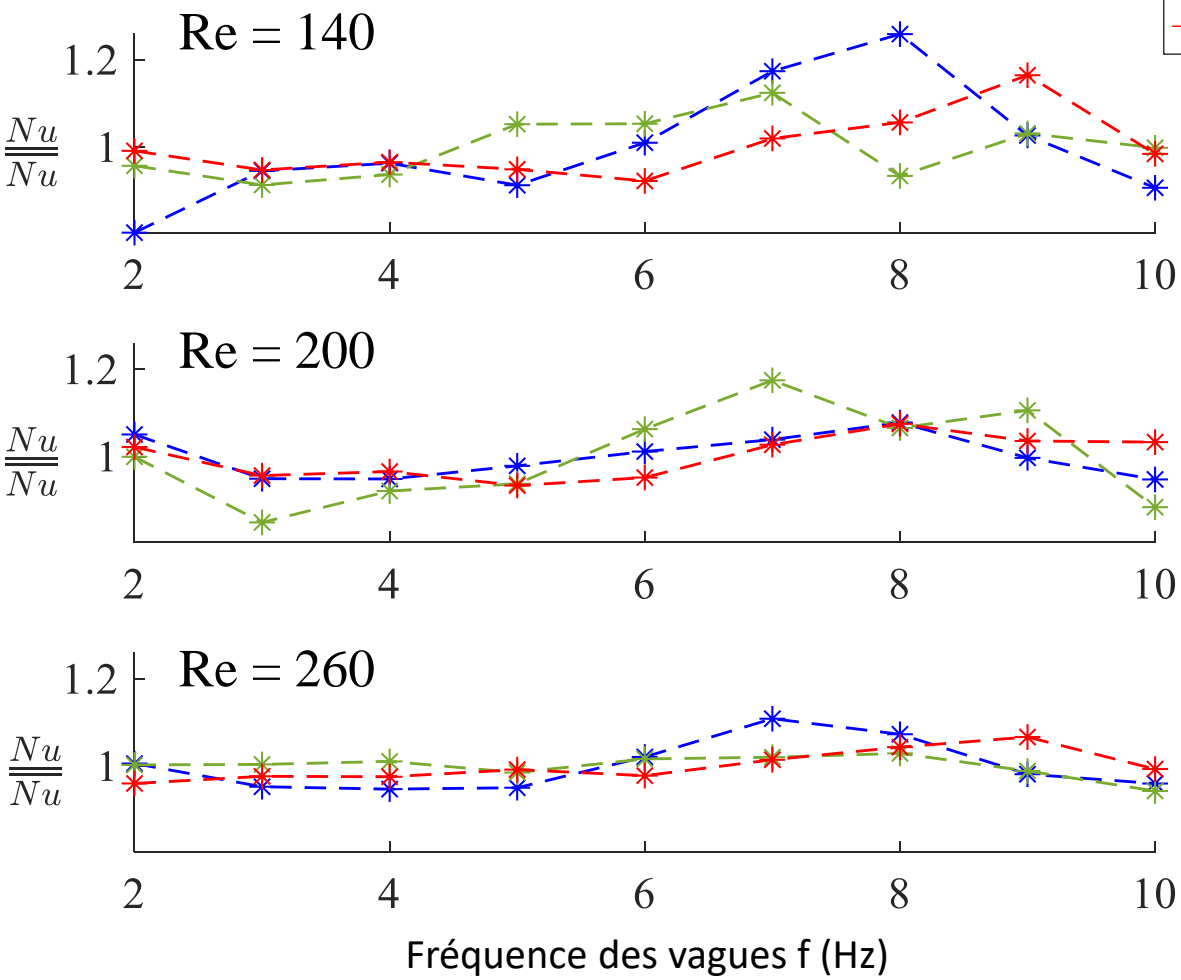
Comparaison du Nu entre séries en normalisant chaque mesure par \overline{Nu} de la série

Caractérisation de l'intensification des transferts



$q_w = 1,26 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$

- * - Inclinaison : $\beta = 2^\circ$
- * - Inclinaison : $\beta = 6^\circ$
- * - Inclinaison : $\beta = 10^\circ$



$$\bar{U} \propto Re \beta$$

$$\bar{\delta} \propto \left(\frac{Re}{\beta} \right)^{1/3}$$

La fréquence des vagues influe sur le transfert de chaleur

Les effets sont supérieurs lorsque \bar{U} et $\bar{\delta}$ diminuent

Caractériser globalement les transferts par le nombre de Nu est complexe expérimentalement

La mesure LIF permet de caractériser localement les transferts

La LIF permet de mesurer δ et T en un point au cours du temps

La périodicité du système permet d'effectuer des moyennes de phase sur les vagues

Données fixées :

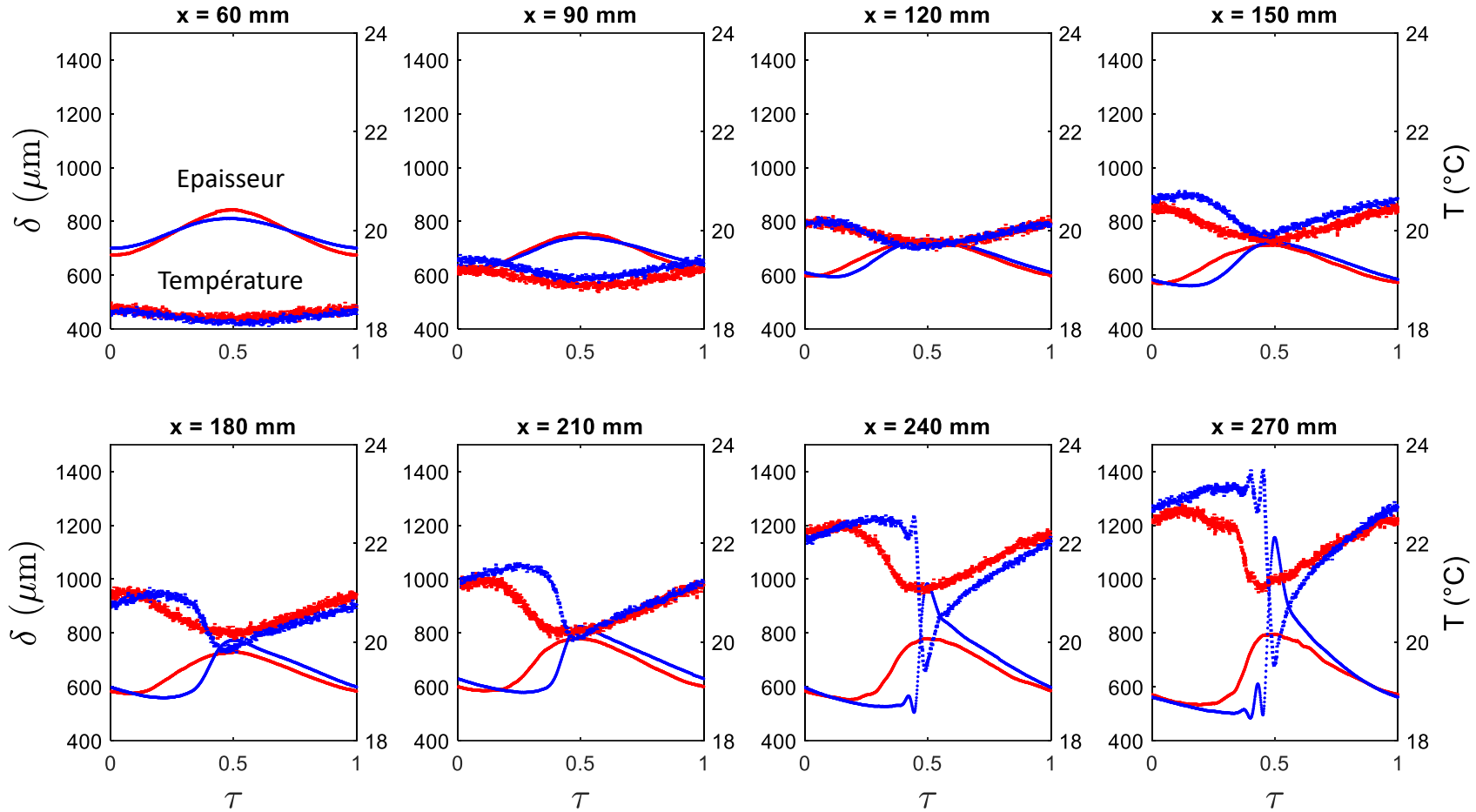
- $\beta = 10^\circ$
- $Re = 200$
- $q_w = 1,26 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$

f (Hz)	x (mm)
3 - 5	60 - 90 - 120 - 150 - 180 - 210 - 240 - 270

Observation de l'évolution spatiale et temporelle de δ et T

Suivi de vagues au cours de leur écoulement

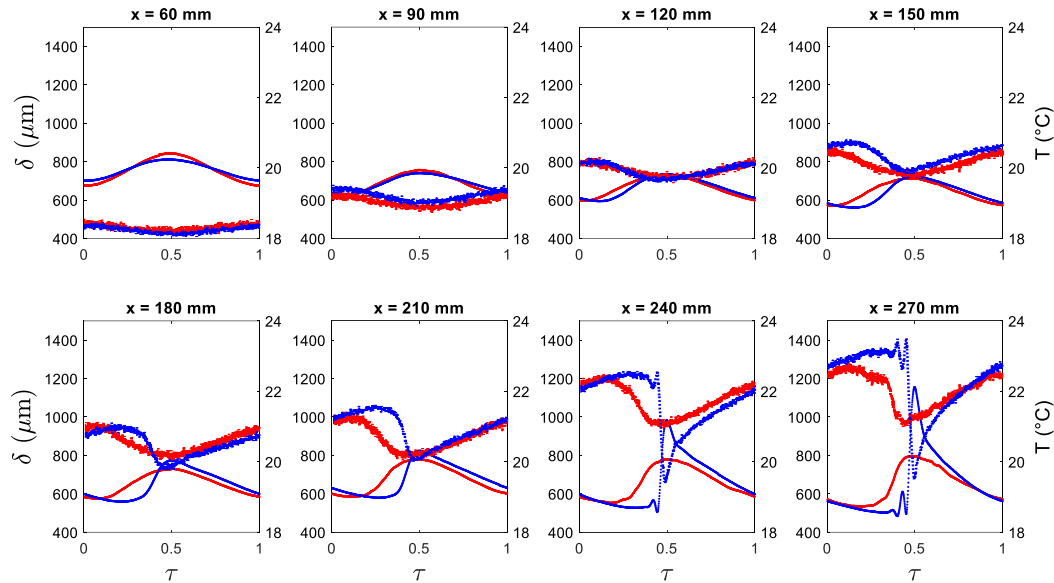
- 3Hz
- 5Hz



➤ $\tau = tf$: temps normalisé

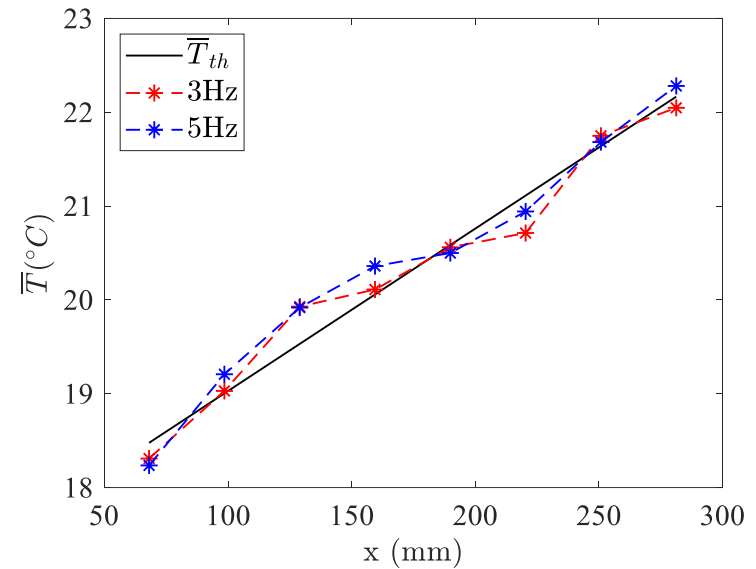
$\beta = 10^\circ$, $Re = 200$, $q_w = 1,26 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$

Mesures LIF résolues dans le temps



Suivi de la croissance de la vague

Caractérisation de δ et T
précisément au cours du temps



Elevations de \bar{T} identiques
pour les deux fréquences

$$\text{Calculer } \frac{T}{\bar{T}} = f\left(\frac{\delta}{\bar{\delta}}\right)$$

Proposition

Conclusions

- Capacité de la thermométrie par LIF à deux couleurs pour obtenir une mesure de température et d'épaisseur de film à travers une interface mobile résolue dans le temps.
- Capture d'une tendance sur l'influence des vagues sur le transfert global.
- Suivi de la vague au cours de son écoulement dans le temps et l'espace.

Perspectives

- Approfondir le traitement des données de LIF et proposer une loi empirique liant la température du fluide en fonction de son épaisseur au passage d'une vague.
- Simulation du champ de température dans l'épaisseur du film au passage d'une vague en utilisant les mesures d'épaisseur LIF.
- Mettre en place une technique de mesure du champ de température dans le film par imagerie de fluorescence pLIF (résolue dans l'espace et le temps) afin de comprendre les mécanismes physiques d'intensification par les vagues.