

# Optimisation d'échangeurs de chaleur à film ruisselant

Nicolas CELLIER  
Laboratoire LOCIE  
Campus Universitaire Savoie Technolac  
73376 Le Bourget du Lac  
contact@nicolas-cellier.net — +336 71 37 74 67

## Introduction

Phénomène observable dans les rues durant une averse particulièrement intense, le film ruisselant est un écoulement complexe qui trouve des applications au sein du génie des procédés industriels.



FIGURE 1 – Film d’eau ruisselant le long d’une rue en pente

Échangeurs de chaleur, évaporateurs sont des équipements technologiques pouvant tirer profit des caractéristiques particulières de ce phénomène.  
En s’écoulant sur une surface plane et sous certaines conditions hydrodynamiques, un fluide pourra commencer à se déstabiliser et présenter des séries d’ondelettes à sa surface. Ce phénomène s’accompagne d’une forte intensification des transferts (thermiques et matière).

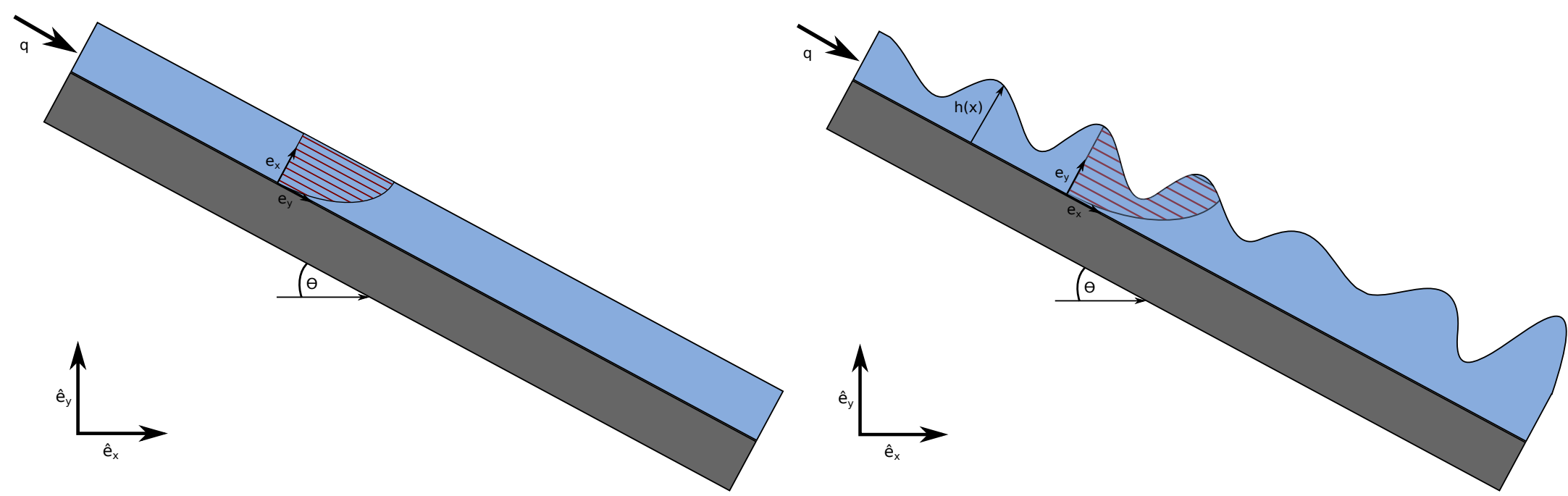


FIGURE 2 – Schéma d’un film ruisselant, avant et après déstabilisation

## Problématique

- Couplage entre l’hydrodynamique et les phénomènes de transfert relativement peu étudié.
- Sa maîtrise peut mener à une intensification des phénomènes au cœur d’équipements technologiques et à la réduction de leur encombrement.
- Nécessité de modéliser correctement l’hydrodynamique du film :
  - Utilisation des équations de Navier et Stokes.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}$$

- Calcul numérique direct (DNS) très couteux en ressource et en temps.
- Utilisation des caractéristiques du film pour simplifier les calculs (théorie “ondes longues”). Ainsi, dans le cas le plus simple, le modèle dit de Benney d’ordre 1, on se ramène à une équation différentielle sur la hauteur du film :

$$\frac{\partial}{\partial t} h(x, t) + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

avec  $q = q_0 + \varepsilon q_1$

$$q_0 = \frac{1}{3} h^3$$
$$q_1 = -\frac{Ct}{3} h^3 \frac{\partial}{\partial x} h + \frac{2Re}{5} h^6 \frac{\partial}{\partial x} h + \frac{We}{3} h^3 \frac{\partial^3}{\partial x^3} h$$

Une fois un tel modèle obtenu, il est possible d’utiliser les outils provenant des mathématiques des systèmes dynamiques pour analyser la stabilité du modèle.

$\rho$	masse volumique	$q$	débit local
$u$	champs de vitesse	$f$	force volumique
$p$	pression	$Ct$	Facteur de pente
$\tau$	tenseur des contraintes	$Re$	Nombre de Reynolds
$h$	hauteur de l’interface	$We$	Nombre de Weber



## Travaux engagés

### Mise en place d’un modèle simple avec prise en compte de la géométrie de plaque

- Volonté d’intensification des transferts
- Provoquer la déstabilisation du film
- Utilisation de la forme de la plaque pour forcer passivement les instabilités du film

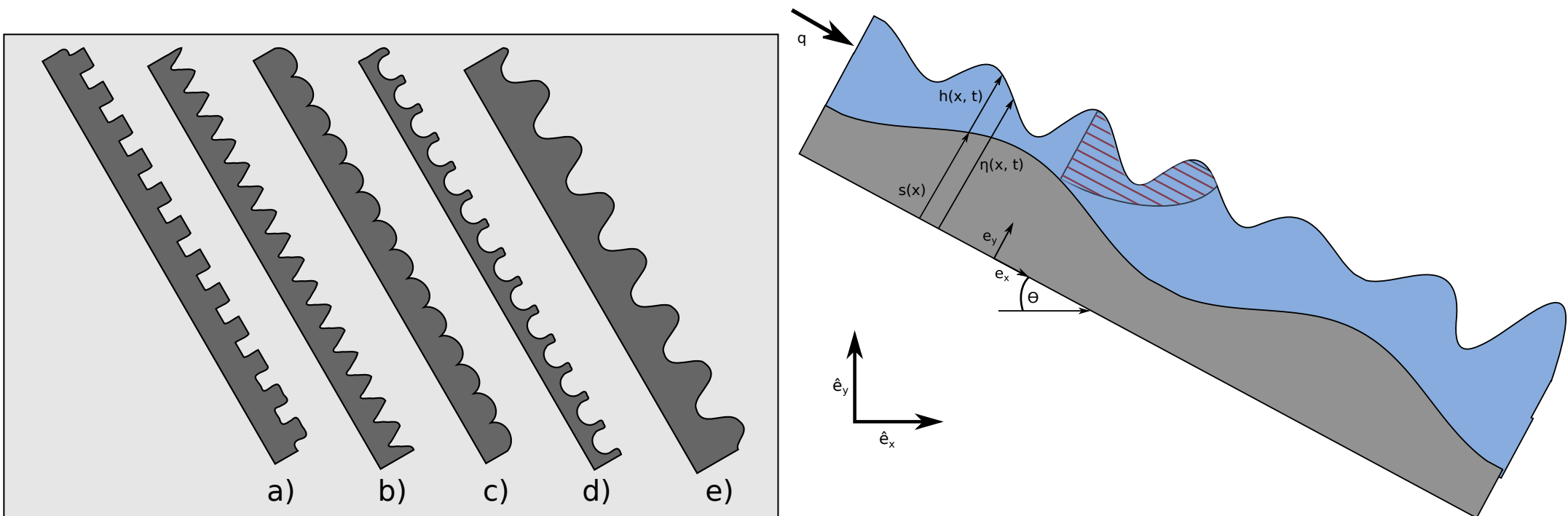


FIGURE 3 – Différentes géométries de fond possible et schéma d’un écoulement sur fond corrugué

- Mise en place similaire au modèle précédent
- Conditions limites appliquées au fond de l’écoulement ( $s(x)$ ) et la hauteur de l’interface ( $s(x) + h(x, t)$ )

Ainsi, dans le cas très simple d’un modèle de Benney d’ordre 1 :

$$\frac{\partial}{\partial t} h + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

avec  $q = q_0 + \varepsilon q_1$

$$q_0 = \frac{1}{3} h^3$$

$$q_1 = \frac{2Re}{5} h^6 \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{Ct}{3} h^3 \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{We}{3} h^3 \left( \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 s}{\partial x^3} \right)$$

- Divergence du modèle dès que  $Re$  devient raisonné ( $Re \approx 1$ )
- La cause est la forte non-linéarité provenant des termes inertiels
- Nécessité de mettre en place des coordonnées curvilignes

## Introduction d’un référentiel mobile

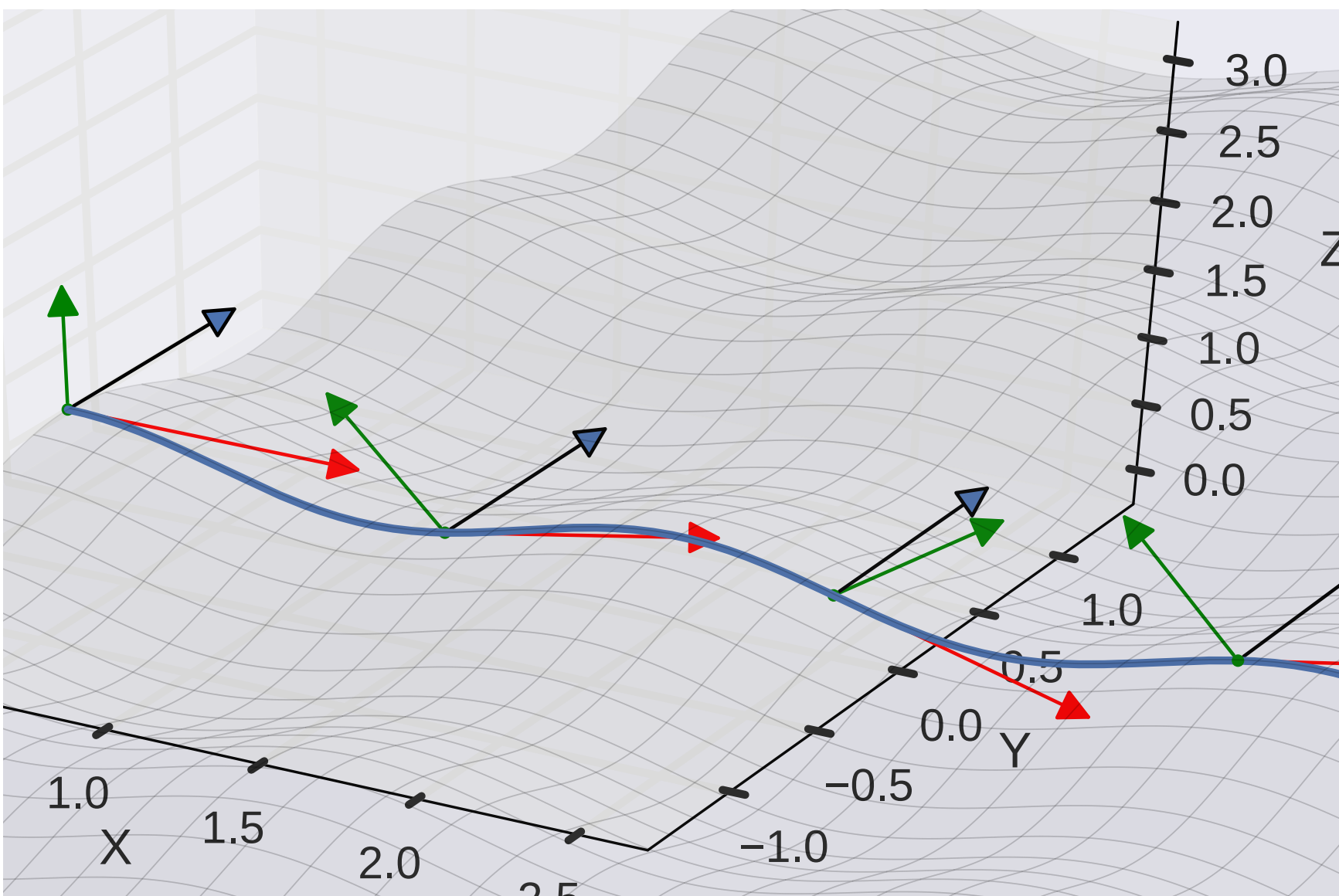


FIGURE 4 – Référentiel mobile de Darboux

Un tel repère est appelé repère de Darboux. Celui ci est construit en prenant

- La normale à la surface considérée
- La tangente à une courbe adossée à cette surface
- Un troisième vecteur orthogonal aux deux premiers.

Dans le cas 2D, la construction est immédiate (par la tangente et la normale à la courbe du support). Dans le cas 3D, il faut construire la courbe par lequel l’écoulement va se faire de façon préférentielle.

## Suite des travaux

Le passage à un modèle plus élaboré (dit de Saint Venant) ainsi que la prise en compte des champs de température est à venir. Le but est de commencer à étudier l’influence des différentes géométries sur l’intensification des transferts thermique à travers un film ruisselant sur fond corrugué.

Une fois le modèle mis en place, des installations situées à Grenoble permettront sa validation dans des cas simples (présence d’obstacles ponctuels ou périodiques sur le support de l’écoulement).

Encadrement de thèse :  
— C. Ruyer - Quil (LOCIE)  
— N. Caney (LEGI)  
— P. Bandelier (CEA - Liten)  
Partenaire industriel : CIAT  
Mis en place et soutenu par la région Rhône-Alpes