

# Influence des échanges radiatifs sur l'étalement d'une goutte de verre



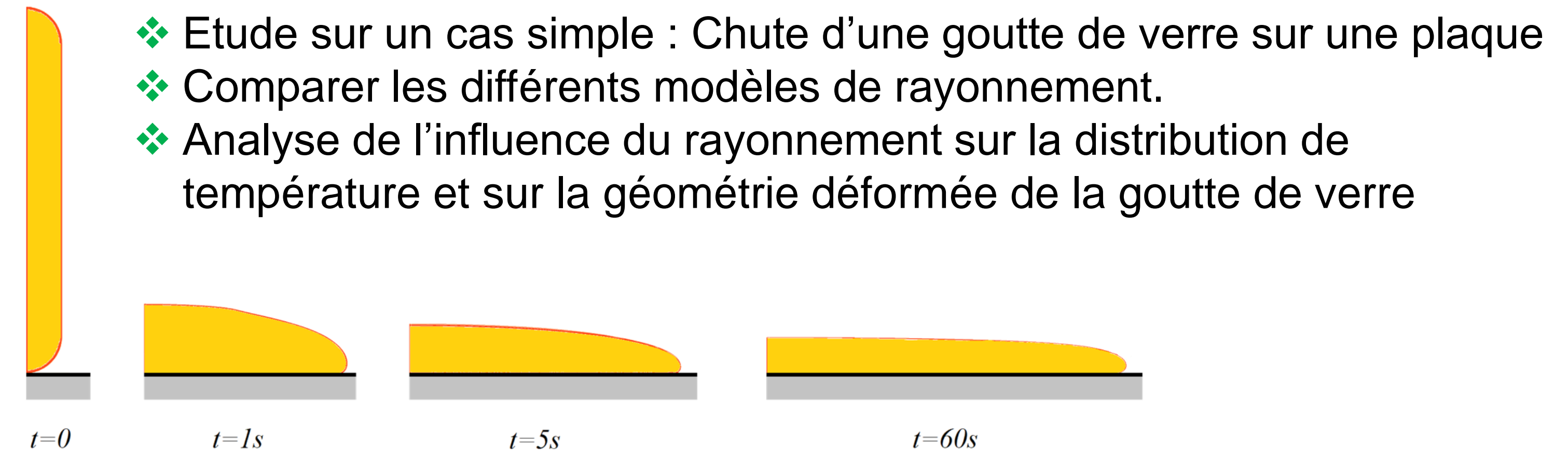
Maxime CRESSIN (1\*), Philippe MOREAU (1), Fabien BECHET (1), Hakim NACEUR (1),  
Dominique LOCHEGNIES (1), Nadir BOUKHARI (2)

## PARTIE 1 : Contexte et objectifs



(Source : Saverglass)

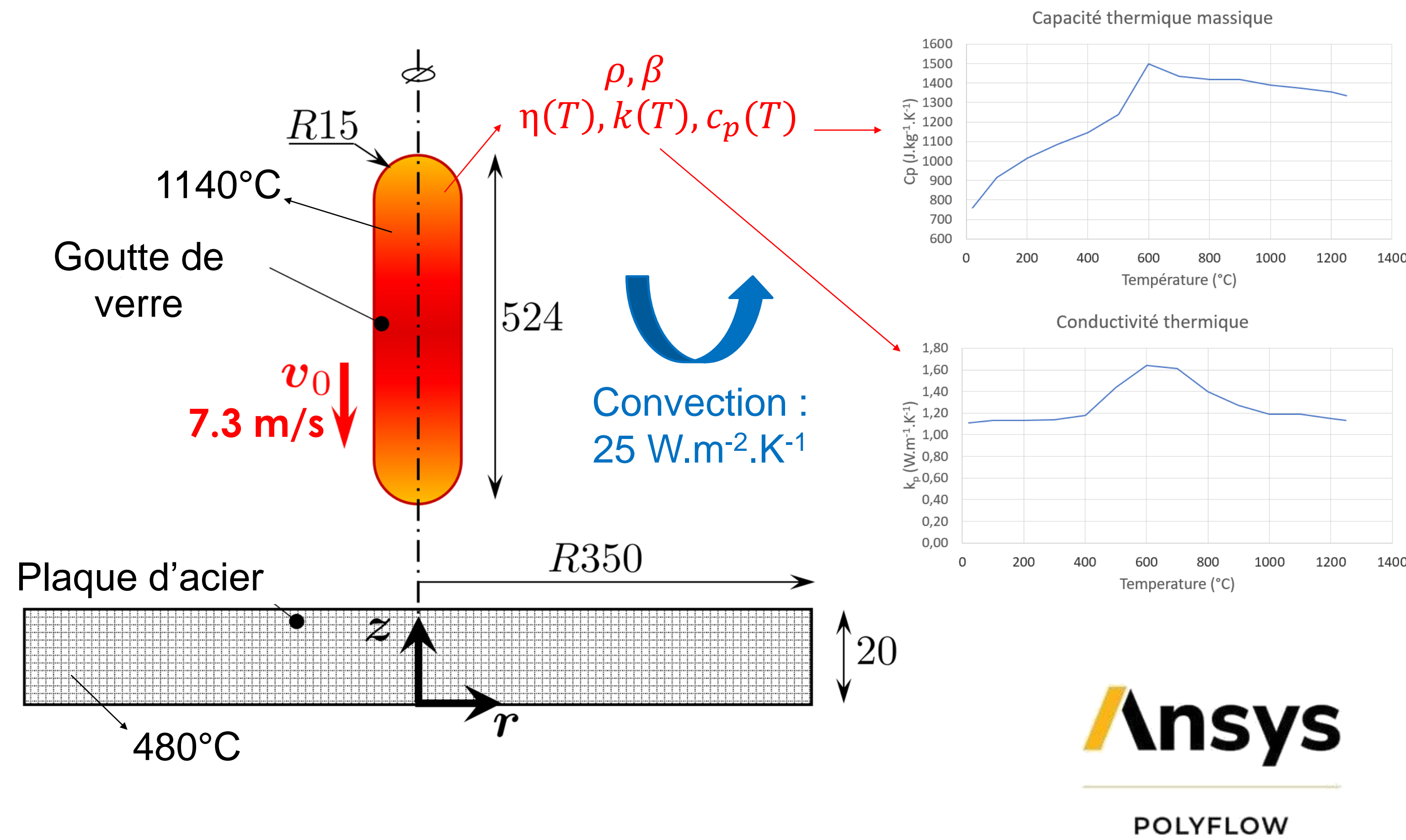
- ❖ Mise en forme du verre via le procédé soufflé/soufflé
- ❖ Gamme de température de formage : 600°C à 1100°C
- ❖ Comportement mécanique du verre fortement dépendant de la température
- ❖ Echanges thermiques lors du formage : conduction (dans le verre), convection (milieu ambiant), rayonnement (volumique et surfacique) et contact (interface verre/outils)



- ❖ Etude sur un cas simple : Chute d'une goutte de verre sur une plaque
- ❖ Comparer les différents modèles de rayonnement.
- ❖ Analyse de l'influence du rayonnement sur la distribution de température et sur la géométrie déformée de la goutte de verre

## PARTIE 2 : Modélisation numérique de l'étalement d'une goutte de verre sur plan

### Description du modèle



### Modélisation thermomécanique

- ❖ Modélisation 2D axisymétrique
- ❖ Fluide visqueux avec viscosité dépendante de la température (loi VFT)
- ❖ Equation d'énergie
 
$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_v \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t)) - \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot \vec{q}_{rad}(\vec{r}, t)$$

Conduction (pointing to the first term), Rayonnement (volumique) Calculé par l'ETR (pointing to the second term), Non disponible sous Polyflow (pointing to the second term)
- ❖ Conditions aux limites
 
$$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = \alpha(T(\vec{r}, t) - T_{\infty}) + \vec{n} \cdot \vec{q}_{opaque}(\vec{r}, T)$$

Convection (pointing to the first term), Rayonnement (surfacique) (pointing to the second term)

$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = 0, \quad r = 0$
- ❖ Condition de type contact collant :  
Méthode de pénalité avec un coefficient d'échange thermique à l'interface de contact  $h_c = 2295 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

## PARTIE 3 : Résultats et discussions

### Approximation du rayonnement avec 3 modèles :

- ❖ **Modèle M1** : Approximation du flux radiatif par une conductivité effective.

- Equation d'énergie :
 
$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_e \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t))$$

Conductivité effective (données expérimentales) (pointing to the term in parentheses)
- Conditions aux limites
 
$$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = \alpha(T(\vec{r}, t) - T_{\infty})$$

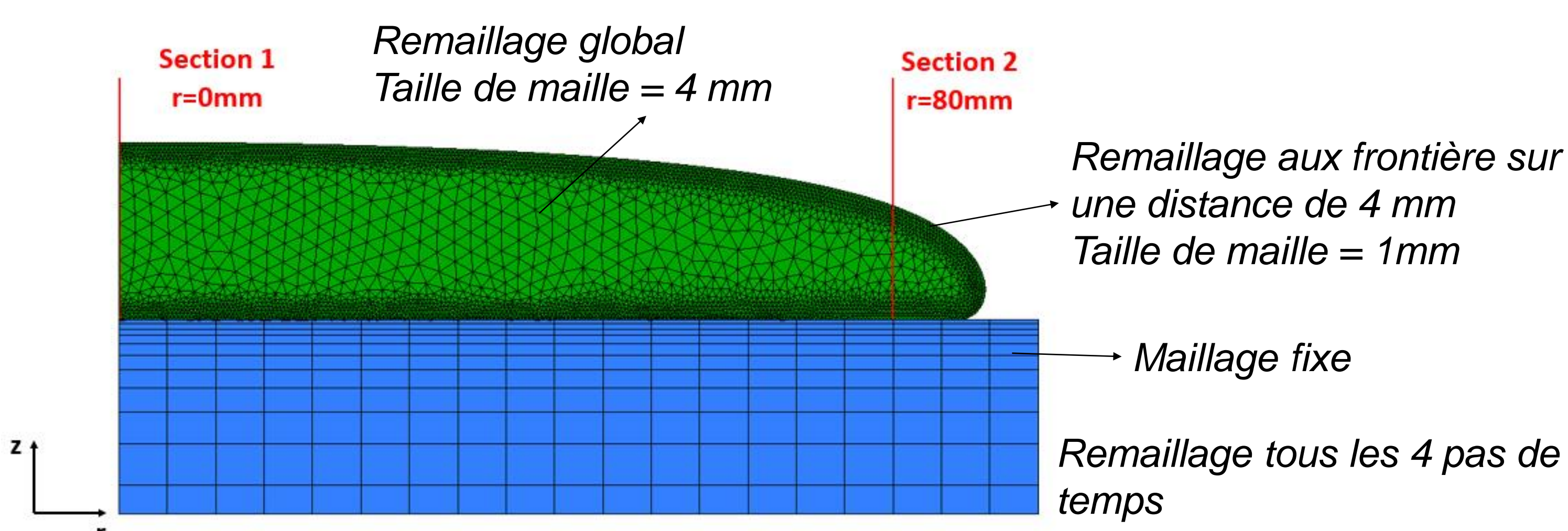
- ❖ **Modèle M2** : Application du rayonnement de surface.

- Equation d'énergie :
 
$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_v \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t))$$
- Conditions aux limites
 
$$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = \alpha(T(\vec{r}, t) - T_{\infty}) + \gamma \sigma [(T(\vec{r}, t))^4 - (T_{\infty})^4]$$

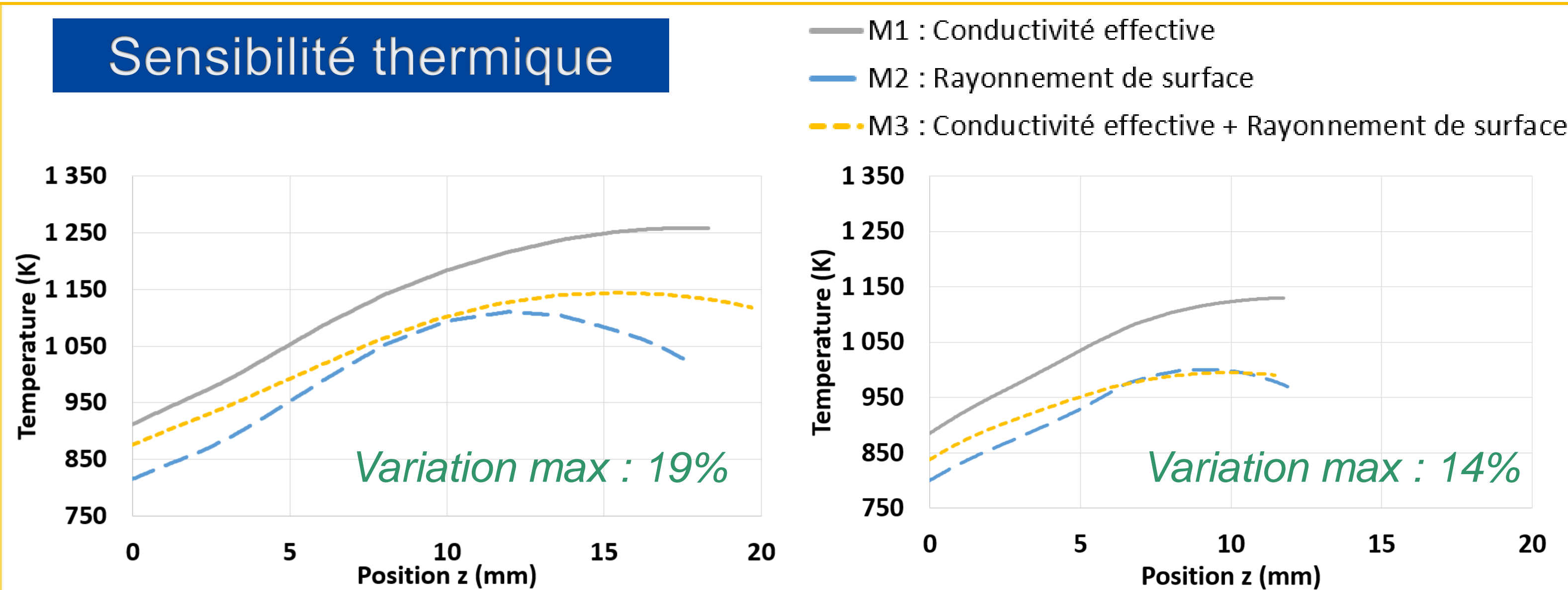
- ❖ **Modèle M3** : Combinaison M1 + M2.

- Equation d'énergie :
 
$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_e \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t))$$
- Conditions aux limites :
 
$$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = \alpha(T(\vec{r}, t) - T_{\infty}) + \gamma \sigma [(T(\vec{r}, t))^4 - (T_{\infty})^4]$$

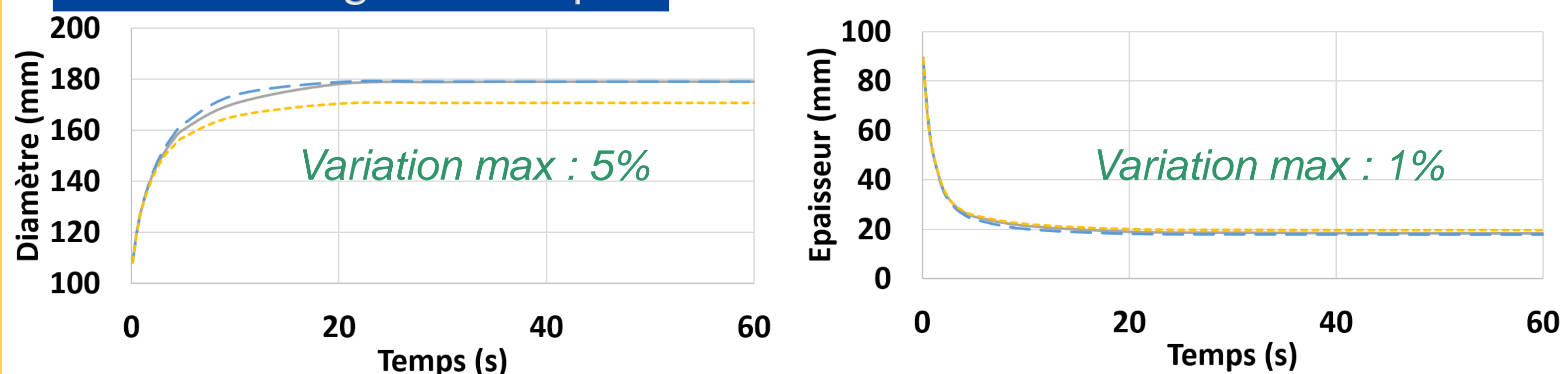
- ❖ Observation des résultats sur 2 sections



### Sensibilité thermique



### Sensibilité géométrique



- ❖ **Modèle M1** : Température la plus élevée => viscosité plus faible => étalement le plus important. Refroidissement plus faible sur la surface libre (écart avec M2 : 19% ; écart avec M3 : 10%).
- ❖ **Modèle M2** : Température plus faible sur les surfaces libres du au rayonnement de surface. Différence max de température de 19% par rapport au modèle M1 => différence de viscosité de 95%.
- ❖ **Modèle M3** : Correction des faiblesses des modèles précédents. Superposition des flux radiatifs dans le domaine opaque (faiblesse du modèle).
- ❖ **Temps de calculs raisonnables compatibles avec une utilisation en milieu industriel** :  
Modèle M1 : 10607s / Modèle M2 : 11152s / Modèle M3 : 11373s
- ❖ **Besoin d'un modèle de référence pour validation**
  - Etude expérimentale
  - Etude numérique avec prise en compte de l'ETR.

(\*) maxime.cressin@uphf.fr

(1) Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS UMR 8201-LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

(2) SAVERGLASS, 3 place de la gare, 60960 Feuquières, France