

# CORNING

Exemples de problématiques courantes dans la  
modélisation de la mise en forme du verre

Allan Fredholm

Centre Européen de Technologie Corning

8 novembre 2012

# Quelques mots d'introduction

---

- Corning est un groupe mondial dont le siège est à Corning, NY
  - Y est implanté le centre de technologie central
  - D'autres centres de recherche existent dans le monde
  
- Centre Européen de Technologie Corning
  - Rôle local, européen
  - Rôle global dans le réseau R&D
  
- Groupe de R&D sur les procédés de mise en forme du verre
  - Moyens expérimentaux (pilotes,...)
  - Utilisation de la modélisation
    - Par des chercheurs du groupe
    - Par des spécialistes de la modélisation

# Introduction

---

- La mission d'un service de R&D sur les procédés de formage du verre est d'apporter des solutions et des prévisions, par exemple :
  - Comment obtenir une forme (épaisseur, rayon de courbure ,...)
  - Choisir parmi des procédés existants, en proposer de nouveaux
  - Prévoir les états initiaux et finaux du procédé
  - Temps nécessaire, cadence envisageable
  - Qualité, précision dimensionnelle prévisibles
  - ...
- La modélisation peut apporter un concours précieux
- L'objectif de cette présentation est de décrire quelques exemples de problématiques courantes

# Quelques éléments caractérisant la mise en forme du verre

---

- Partir d'un fluide visqueux 10 poises → 100 000+ poises.
- Réaliser une forme d'objet par différentes méthodes
  - Pressage
  - Famille du soufflage
  - Etirage
  - Centrifugation
  - ...
- Dans beaucoup de cas un changement d'épaisseur conséquent
- Souvent, un contact avec un outillage de mise en forme
- Un accroissement de plusieurs ordres de grandeur de la viscosité

# Eléments à prendre en compte pour la modélisation

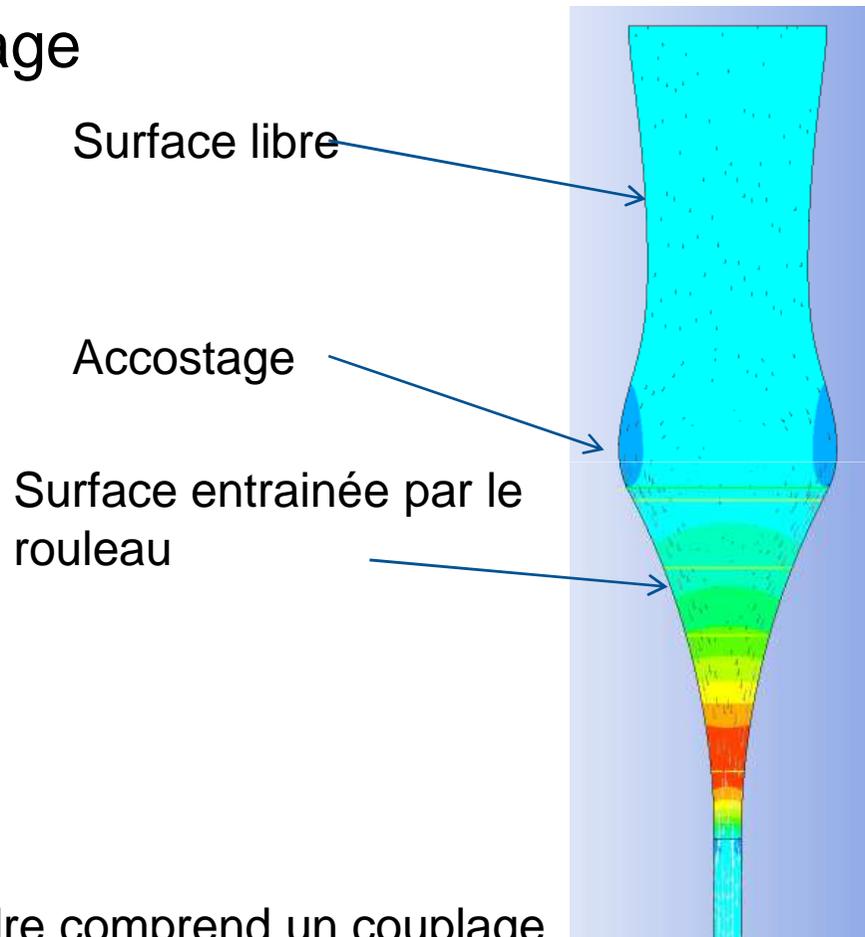
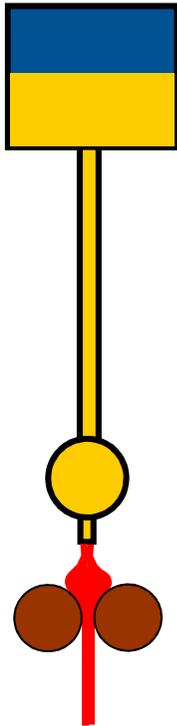
---

- Le verre est semi-transparent
- Surfaces libres et accostages
- Contact non parfait
- Facteurs de forme de l'écoulement (Fusion Draw, Float, étirages (downdraw, updraw))

# Exemple de cas d'écoulement à surface libre

## Le procédé de laminage

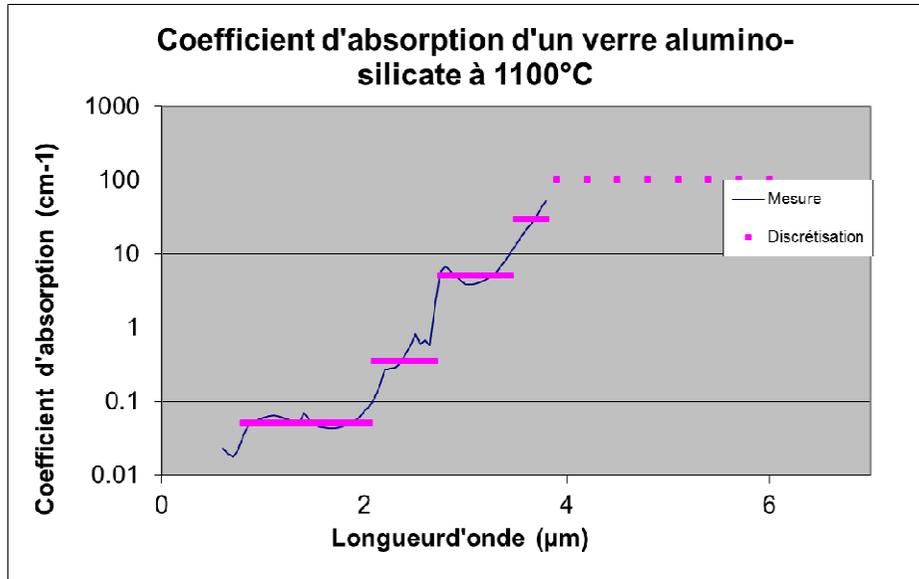
- Cas du laminage



Le problème à résoudre comprend un couplage entre transferts thermiques et écoulement Newtonien

- Exemple de questions
- force nécessaire
  - température en sortie de rouleaux
  - paramètres clé

# Verre semi-transparent



Des logiciels permettant de modéliser les transferts thermiques en MST existent

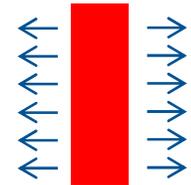
- temps de calcul accrus

Peuvent ne pas intégrer en même temps d'autres aspects tels que surfaces libres, grandes déformations

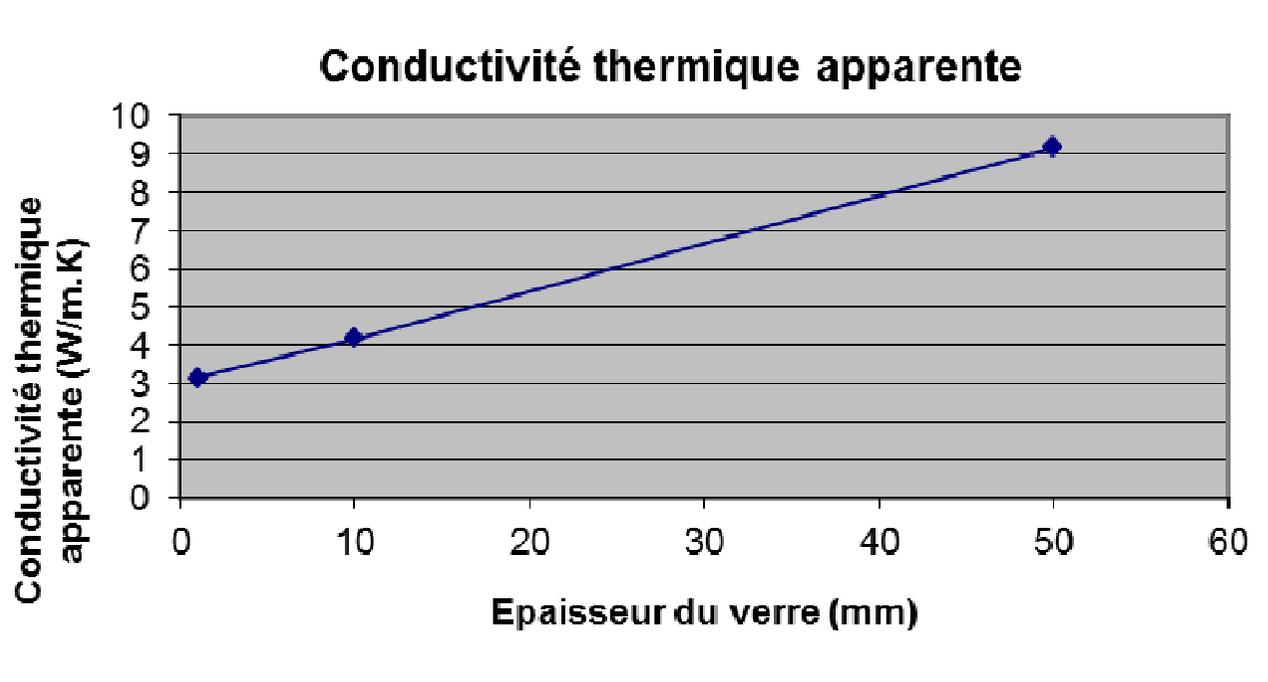
Bande de longueurs d'onde (µm)	Coefficient d'absorption (cm-1)	Pourcentage rayonnement corps noir à 1100°C	Epaisseurs optiques pour différentes épaisseurs de milieux			
			Feuille verre LCD	Pressage	Tube de coulée	Feeder laminage
			0.7 mm	4 mm	25 mm	70 mm
0.6-2.1	0.05	27.7%	0.0035	0.02	0.125	0.35
2.1-2.75	0.35	18.6%	0.0245	0.14	0.875	2.45
2.75-3.5	5	18.9%	0.35	2	12.5	35
3.5-3.9	30	6.9%	2.1	12	75	210
>3.9	100	28.0%	7	40	250	700

Ni totalement optiquement mince ni totalement optiquement épais

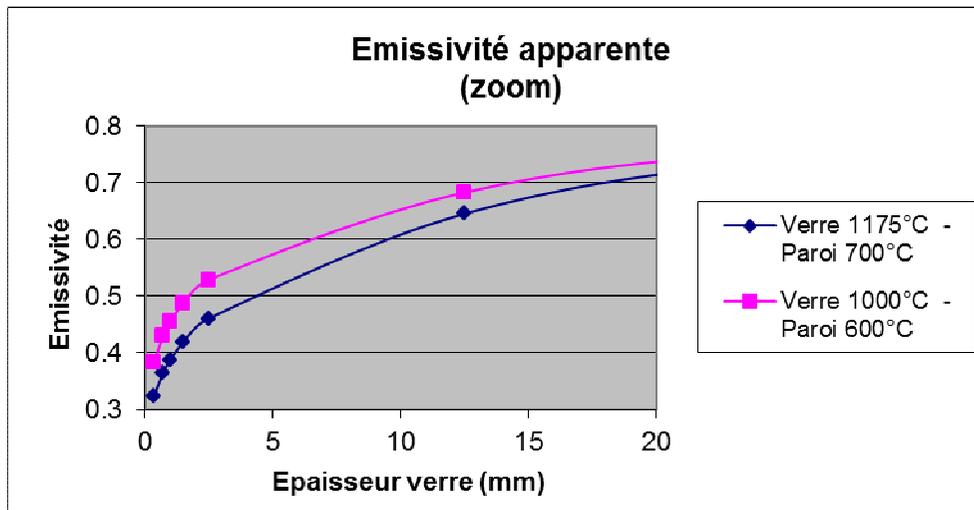
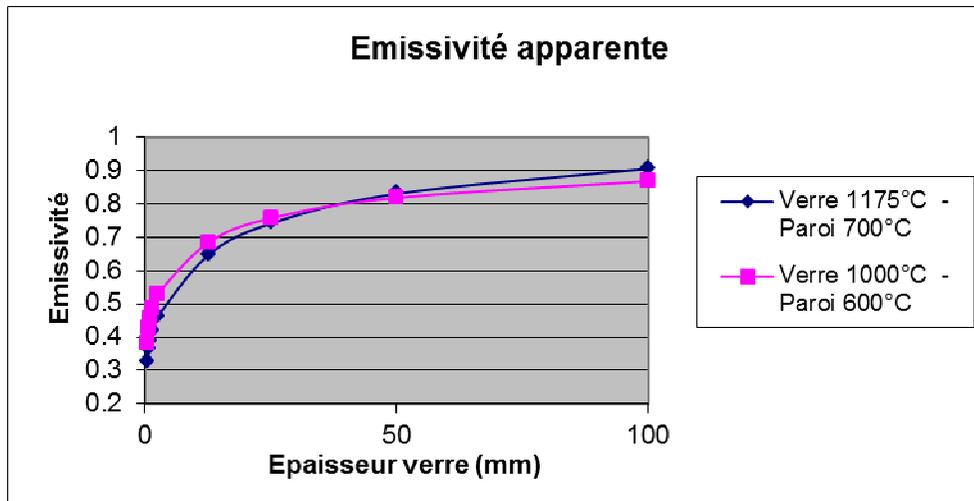
# Approximation de la contribution radiative par des propriétés apparentes – conductivité thermique



- Conductivité thermique
  - Verre alumino-silicate à 1100°C
    - Aproximation de Rosseland: 66 W/m.K
      - Surestime la conductivité de plus d'un ordre de grandeur



# Approximation de la contribution radiative par des propriétés apparentes – Emissivité de surface



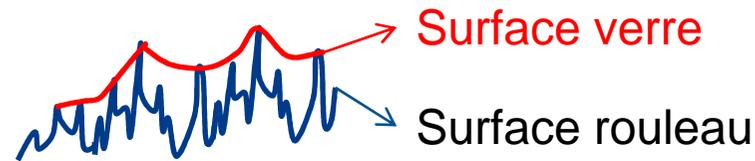
- Emissivité augmente avec l'épaisseur
- L'émissivité demeure non négligeable aux faibles épaisseurs
- La température a un effet non négligeable

## Qualité de contact

---

- Il est bien connu que lors du contact entre verre et outillage, le contact thermique est notoirement imparfait
- Parfois des imperfections macroscopiques
  - « Frisure »
- Réplication imparfaite au niveau microscopique
- Il est nécessaire de prendre en compte une résistance de contact

# Comparaison des morphologies de surface outillage - verre

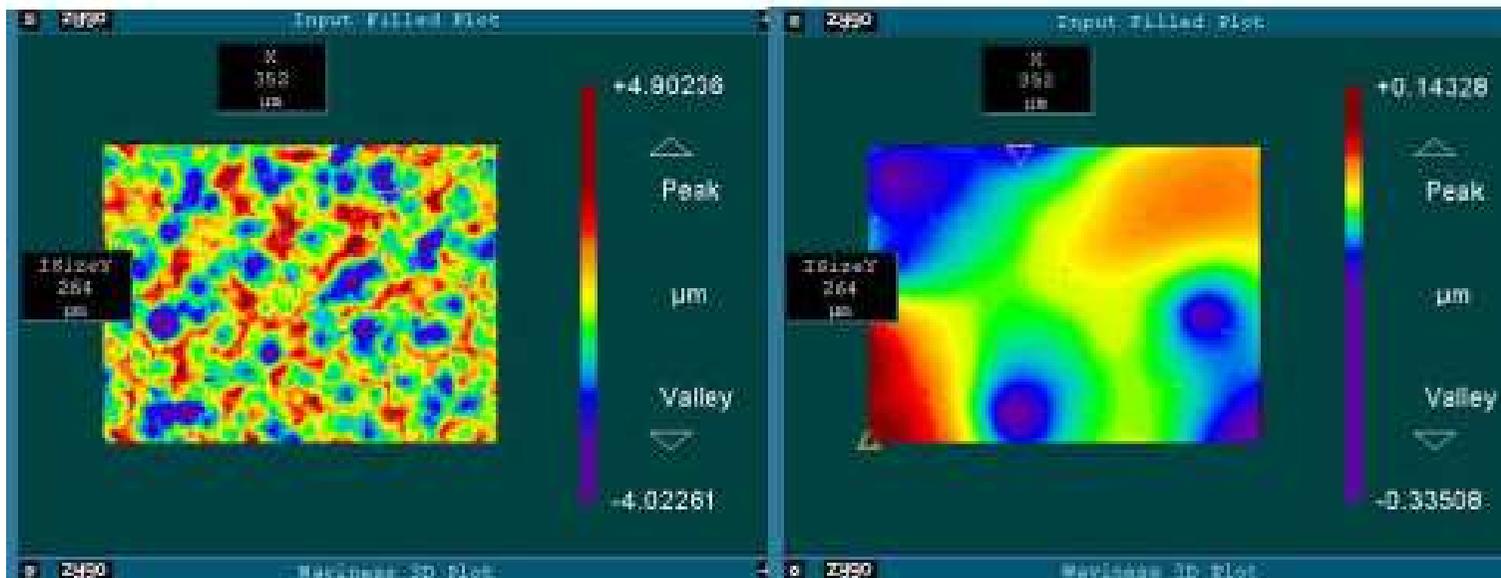


Surface rouleau de laminage

9  $\mu\text{m}$  pleine échelle

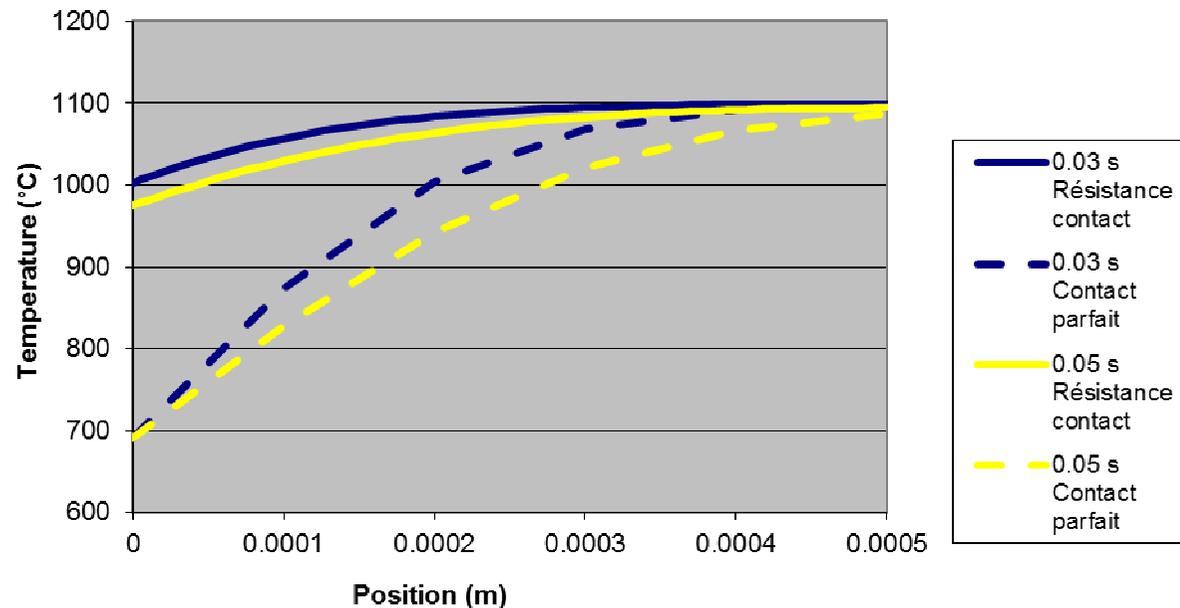
Surface verre

0.5  $\mu\text{m}$  pleine échelle

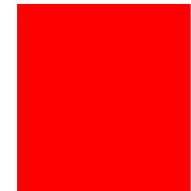


# Effet de la prise en compte d'une résistance de contact thermique

Refroidissement avec ou sans résistance de contact



Outillage



Verre, demi-  
épaisseur  
0.5 mm

Température outillage  
imposée à 675°C

Pour le calcul de  
contact parfait,  
outillage initialement à  
600°C, verre à 1100°C

- Cet effet est clairement considérable
  - Il est susceptible de fortement dépendre des conditions opératoires

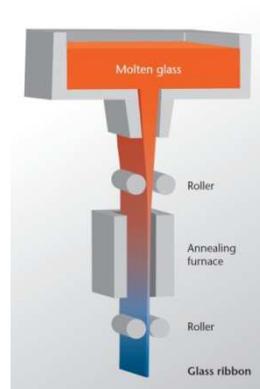
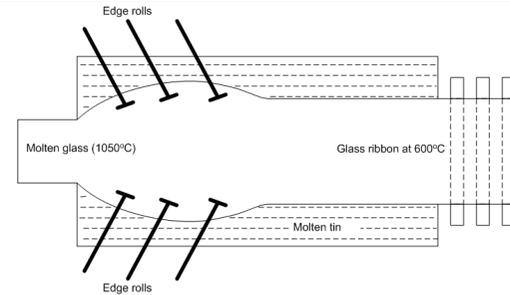
# Possibilité comparées de logiciels commerciaux

Problématique	Fluent	Polyflow	Comsol	NoGrid
Surfaces libres	Red	Green	Green	Green
Accostage surface libre - surface en mouvement	Red	Yellow	Light Green	Green
Milieu semi transparent	Green	Red	Yellow	Yellow
Rayonnement surface à surface	Green	Green	Green	Red

- Aucun outil disponible ne résout tous les aspects de la physique souhaités
- Le choix du logiciel dépendra du cas particulier traité

# Autre exemple – L'étirage de verre en feuille

- Procédé Float



- Procédé downdraw

- Procédé Fusion Draw



# Simplification de la physique

- Les équations 3D de l'écoulement Newtoniens se simplifient

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{xy}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_{yy}) = -\rho gh, \quad (2)$$

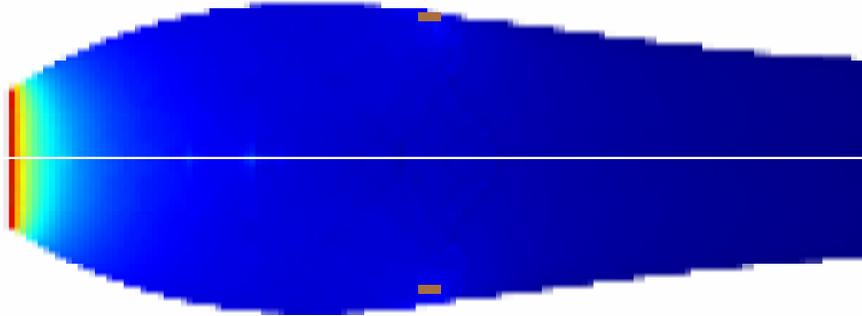
$$\frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0, \quad (3)$$

where

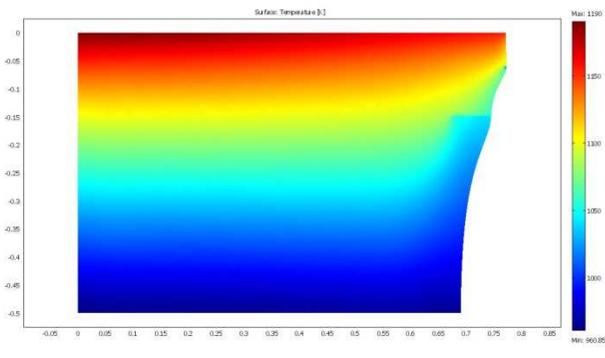
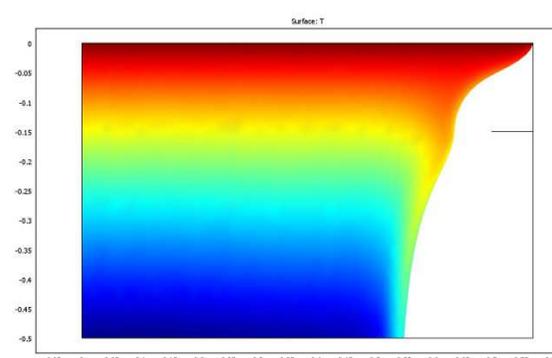
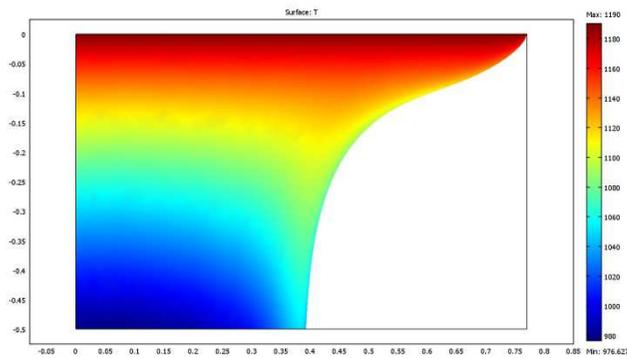
$$\sigma_{xx} = 2\mu h \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad \sigma_{yy} = 2\mu h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad \sigma_{xy} = \mu h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right).$$

- Un couplage avec les transferts thermiques est possible
- Une simplification plus poussée encore est possible si la largeur du ruban est maintenue

# Applications



Float (version simplifiée)



Downdraw, différentes conditions opératoires étant considérées)

# Conclusion

---

- Des avancées considérables ont été apportées par les logiciels commerciaux
- Néanmoins aucun ne permet un traitement physique complet
- Les traitements incluant des physiques sophistiquées sont souvent lourds à mettre en oeuvre
- Il est nécessaire de
  - Faire les bons choix d'approximations
  - Introduire des propriétés « apparentes » pertinentes

# Remerciements

---

- L. Joubaud
- A. Bisson
- A. Amosov

CORNING