

Transferts thermiques dans le verre au cours du procédé de thermoformage

B. Le Corre^{1,2}, A. Collin¹, Y. Meshaka², G. Jeandel¹

- 1 – Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA, Nancy)
2 – Institut Jean Lamour (IJL, Nancy)

Société Française de Thermique
6ème Journées d'Études en Rayonnement Thermique
10-11 Octobre 2012



- Contexte industriel
 - Définition du thermoformage
 - Problèmes de mise en forme
 - Développement d'un banc d'essais
 - Problématique / Objectifs
- Modélisation thermique
 - Solutions proposées pour la résolution numérique
 - Développement MMC
 - Validation numérique
- Étude d'un cas de thermoformage
 - Présentation du modèle thermique
 - Influence des paramètres
 - Cas thermomécanique
- Bilan des résultats
- Perspectives

Définition du thermoformage

→ Procédé qui consiste à chauffer une pièce de verre (généralement plat) afin d'abaisser sa viscosité et de lui faire épouser la forme d'un moule situé en-dessous.

Forme
initiale



Forme
finale



essai de thermoformage

➤ Pièces mises en forme par thermoformage:

- Pare-brise

(Groombridge et al. (2003), *Development and implementation of visual feedback technology in automotive windscreen manufacture*)

- Lentilles optiques

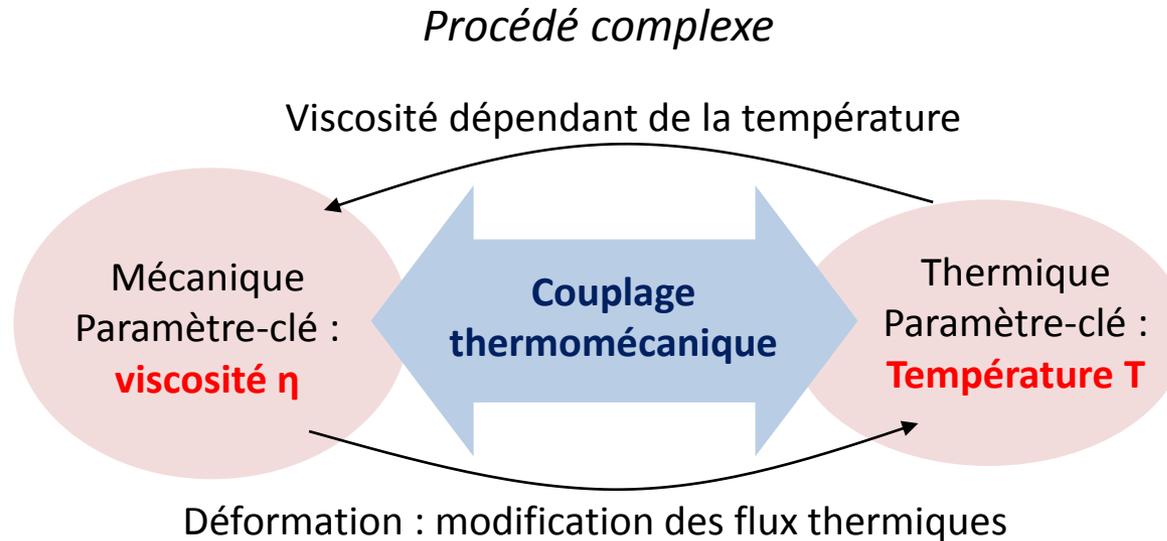
(Agnon et al. (2005), *An inverse modelling technique for glass forming by gravity sagging*)

- Pièces de décoration, mobilier, arts de la table

(Beveridge et al. (2005), *Le verre – L'art et les techniques du travail au four*)

Problèmes de mise en forme

- Défauts observés sur certaines pièces thermoformées :
 - Épaisseurs non homogènes
 - Défauts de surface (marquage moule)
 - Ruptures
- Cause :



→ Artisanat : **méthode d'essais-erreurs**

Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Déf. thermoformage

Pb. de mise en forme

Développement banc d'essais

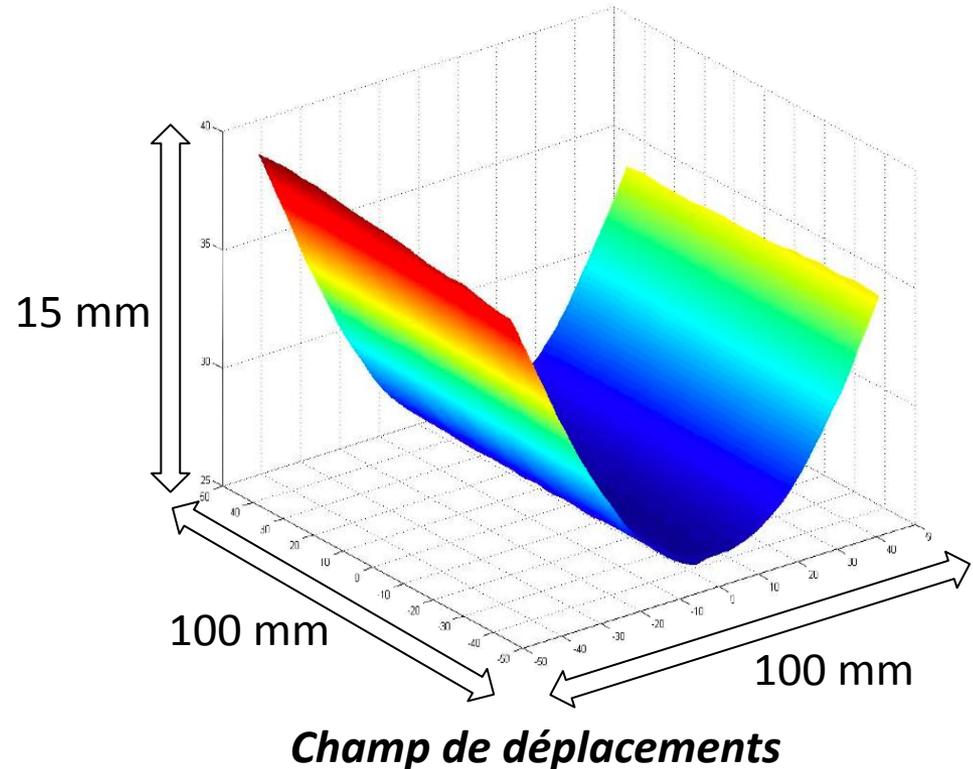
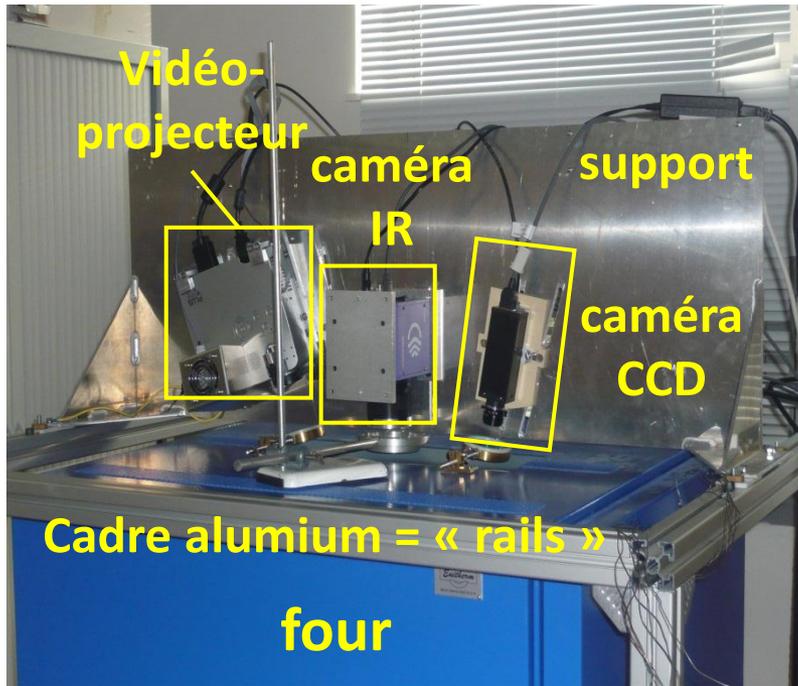
Écart de température

Problématique

Développement d'un banc de mesures

Thèse de L. Soudre (2009)

→ Mesure des températures et des déplacements



Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Déf. thermoformage

Pb. de mise en forme

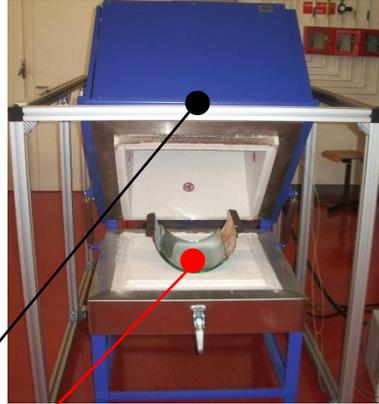
Développement banc d'essais

Écart de température

Problématique

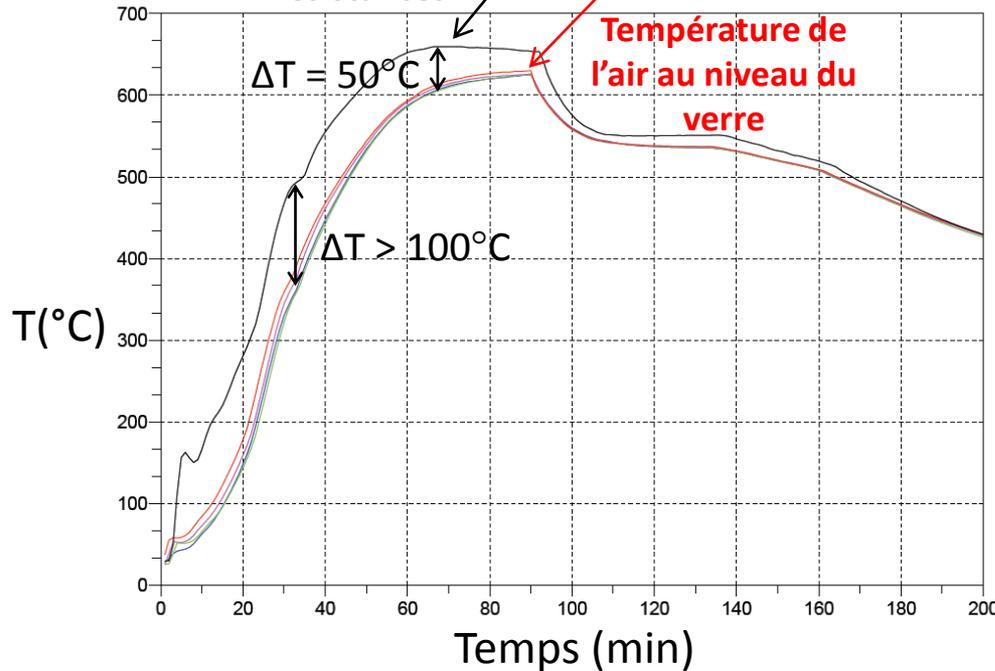
Mise en évidence d'un écart entre T_{consigne} et $T_{\text{mesurée}}$

Thèse de L. Soudre (2009)



Température résistances

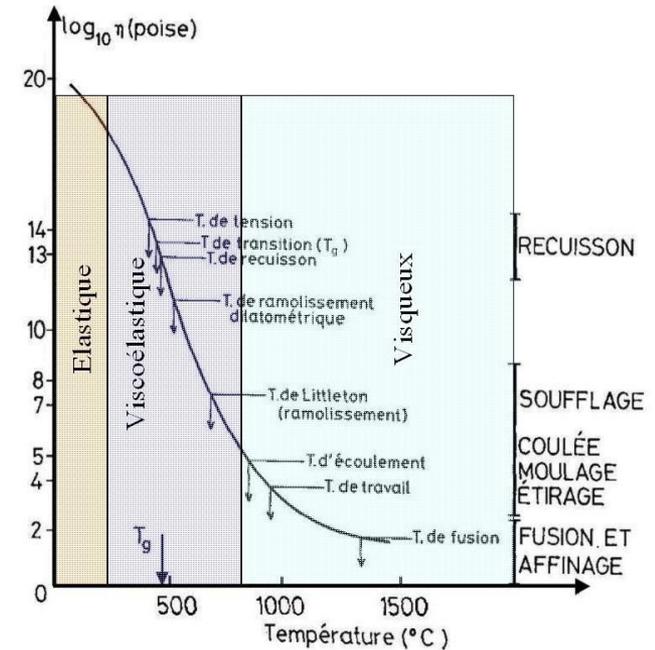
Température de l'air au niveau du verre



Hauteurs :

- 165mm
- 115mm
- 90mm
- 75mm

Zarzycki (1982), *Les verres et l'état vitreux*



Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Déf. thermoformage

Pb. de mise en forme

Développement banc d'essais

Écart de température

Problématique

Problématiques/Objectifs du projet

- Problématique : simuler numériquement le procédé de thermoformage
 - Mieux appréhender l'influence des paramètres (chargement thermique, moule, géométrie initiale) sur la géométrie finale de la pièce.
 - A long terme, déterminer par analyse inverse le chargement thermique optimal à imposer en intégrant les conditions opératoires.
- Objectifs :
 - Développer un code de calcul radiatif spécifique (MMC)
 - Implémenter les C.L. radiatives
 - Disposer d'un code de résolution de l'équation de la Chaleur
 - Coupler la mécanique avec la thermique

Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Déf. thermoformage

Pb. de mise en forme

Développement banc d'essais

Écart de température

Problématique

Résolution de l'équation de la Chaleur

Bilan des échanges thermiques sur un élément de volume :

- ✓ Conduction
- ✓ Rayonnement
- ✗ Pas de convection (on considère que le verre reste solide)

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)) + S_r$$

Méthode de
Monte Carlo

Quel code de résolution?

Solution EF2D

A un temps t_i donné :

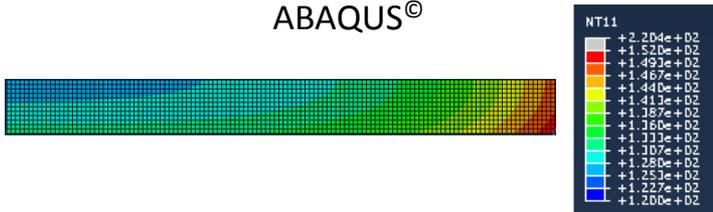
THERMIQUE (gérée par ABAQUS®)

Subroutine rayonnement implémentée dans ABAQUS®

Calcul du terme source par une méthode de Monte Carlo au début de l'incrément avec les données de l'instant t_{i-1} (température, maillage)

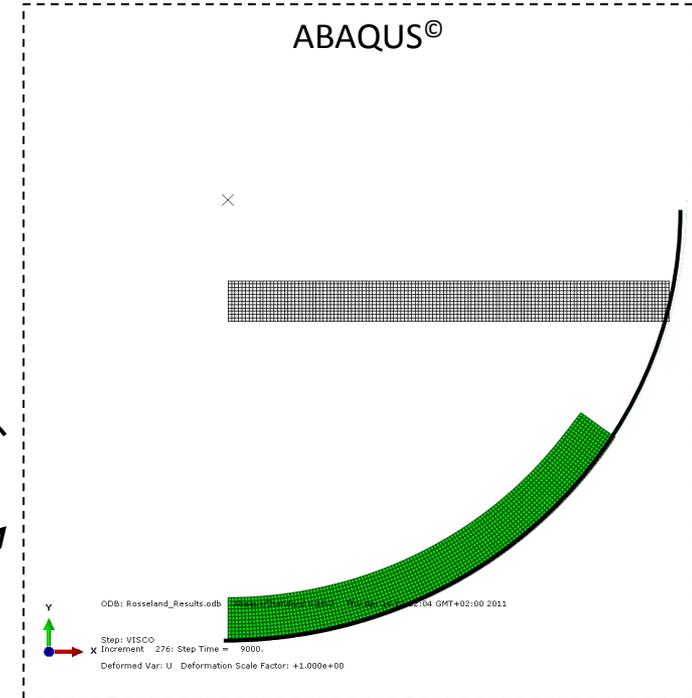
1 calcul par pas de temps

Résolution de l'équation de la Chaleur : ABAQUS®



MÉCANIQUE

ABAQUS®



N itérations

Solution éléments finis 2D (EF2D)

→ Couplage thermique faible

Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Résolution éq. de la Chaleur

EF2D/VF2D

MMC

Tirages aléatoires

Validation MMC

Validation EF2D/VF2D

Solution VF2D

A un temps t_i donné :

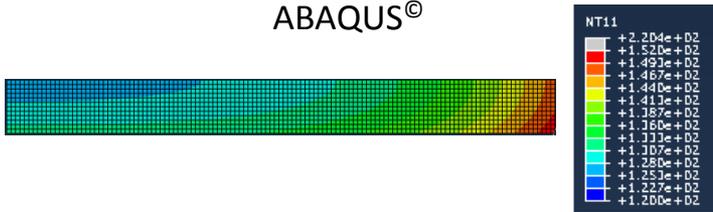
THERMIQUE (gérée par ABAQUS[®])

Subroutine rayonnement implémentée dans ABAQUS[®]

Calcul du terme source par une méthode de Monte Carlo au début de l'incrément avec les données de l'instant t_{i-1} (température, maillage)

1 calcul par pas de temps

Résolution de l'équation de la Chaleur : ABAQUS[®]



Solution éléments finis 2D (EF2D)

→ Couplage thermique faible

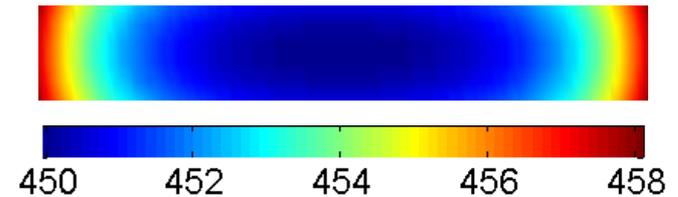
THERMIQUE (Externe à ABAQUS[®])

Code FORTRAN

Calcul du terme source par une méthode de Monte Carlo

N itérations

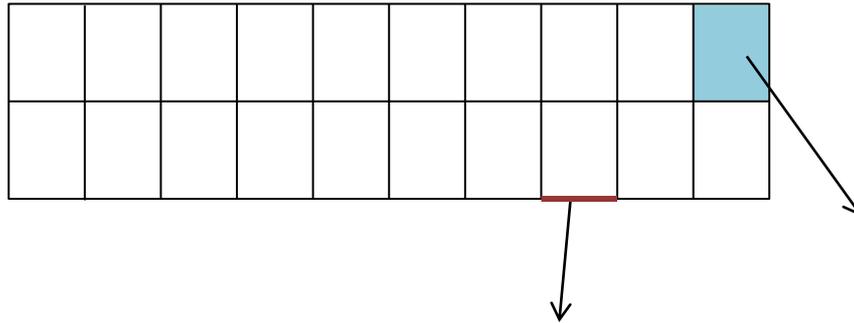
Résolution de l'équation de la Chaleur : Code « maison » volumes finis



Solution volumes finis 2D (VF2D)

→ Couplage thermique fort

Maillage du domaine (2D) :



1.Emission de quanta depuis une paroi (frontières du domaine)

2.Emission de quanta depuis le milieu

Hypothèses:

Verre : absorbant (et émettant), non diffusant

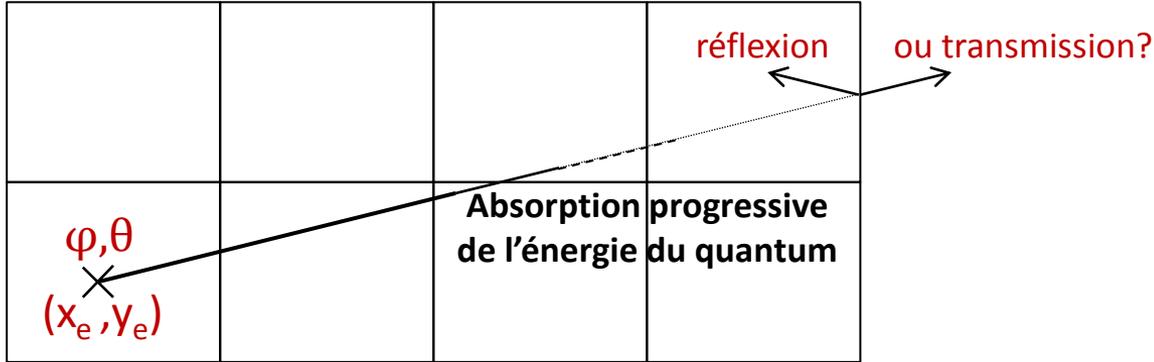
Milieu gris par bandes : ε_λ , κ_λ , n_λ constants sur une bande de longueurs d'onde (ou fréquences)

Réflexion spéculaire

T constante sur un élément

Tirages aléatoires

Maillage 2D



Tirage aléatoire :

- Du point d'émission (x_e, y_e)
- De la direction (φ, θ)
- Transmission ou réflexion

Choix des autres paramètres :

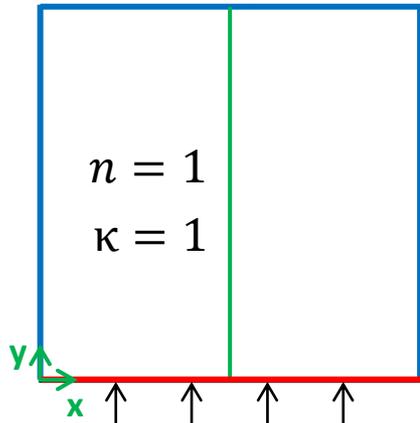
- Nombre de quantas envoyés par élément : proportionnelle à la taille d'un élément.
- Énergie transportée par quantum : $Q_{\text{elem}}/\text{nb}$ quanta
- Nombre de quanta envoyés sur une bande de longueurs d'onde : proportionnel à $Q_{\text{bande de longueurs d'onde}}/Q_{\text{totale}}$

Validation du code MMC

→ Échanges thermiques uniquement par rayonnement

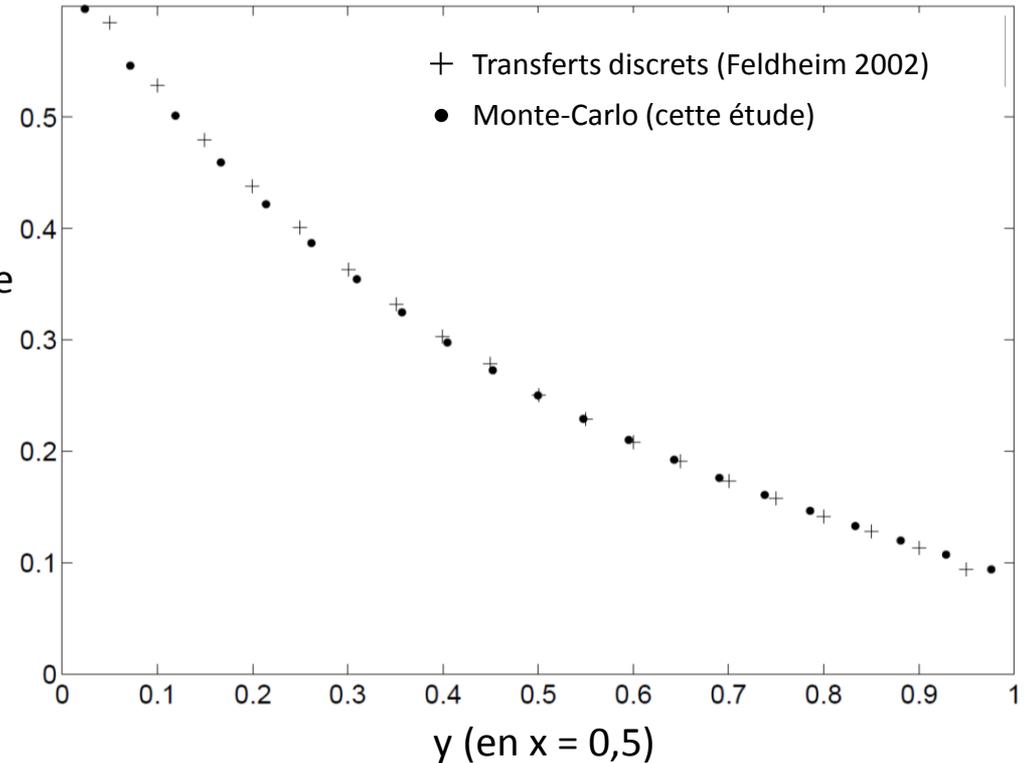
Cas-test

$x = 0,5$ $T = 0K$



Enceinte carrée 1 x 1 ($\epsilon = 1$)

Flux thermique
surfaiques
($W.m^{-2}$)



(Feldheim (2002), *Simulation numérique des transferts thermiques combinés conduction-convection-rayonnement dans des domaines de géométrie complexe*)

Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Résolution éq. de la Chaleur

EF2D/VF2D

MMC

Tirages aléatoires

Validation MMC

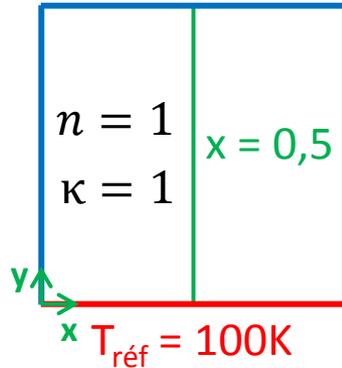
Validation EF2D/VF2D

Validation de EF2D et VF2D

→ Échanges thermiques par conduction et rayonnement

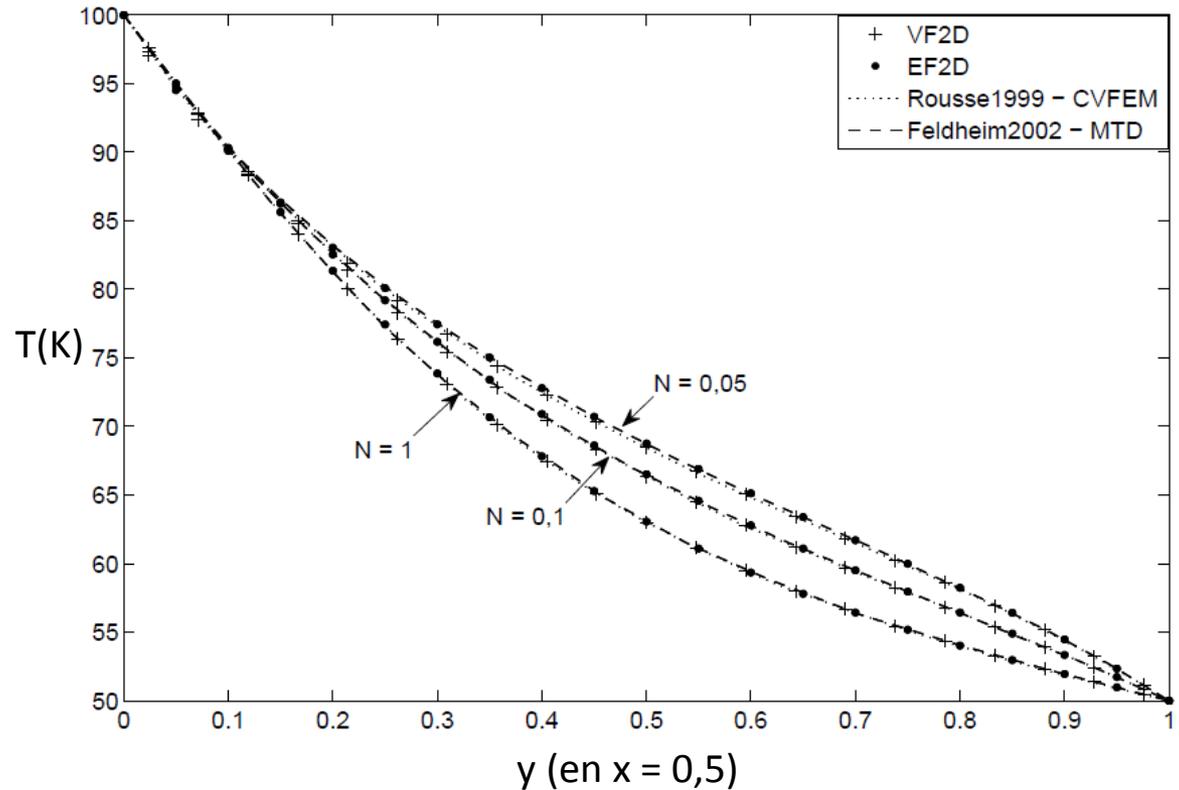
Cas-test

$T = 50\text{K}$



Enceinte carrée 1 x 1 ($\epsilon = 1$)

$$N = \frac{\kappa\lambda}{4\sigma T_{\text{réf}}^3}$$



(Rousse et al. (1999), *Numerical predictions of two-dimensional conduction, convection, and radiation heat transfer. ii. validation*)

(Feldheim (2002), *Simulation numérique des transferts thermiques combinés conduction-convection-rayonnement dans des domaines de géométrie complexe*)

Nombre de Stark	Conductivité
1	0,2268
0,1	0,02268
0,05	0,01134

Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Résolution éq. de la Chaleur

EF2D/VF2D

MMC

Tirages aléatoires

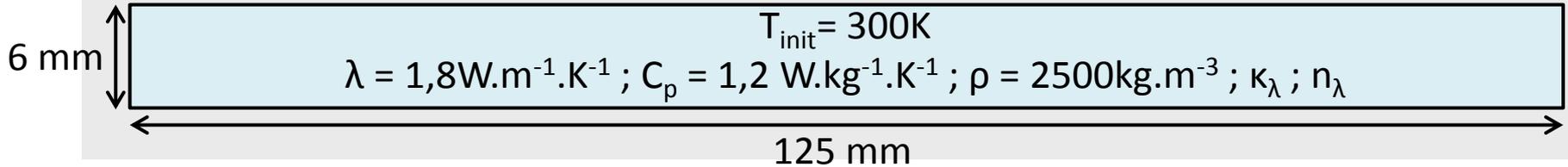
Validation MMC

Validation EF2D/VF2D

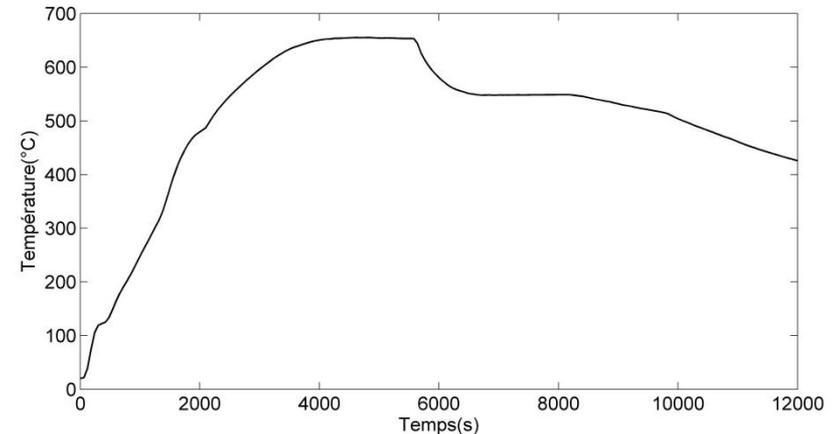
Thermoformage – cas étudié

- Géométrie et propriétés du verre :

Verre entouré d'un gaz considéré comme un corps noir ($h = 10 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$)



- Chargement thermique ($T_{\text{gaz}} = T_{\text{air}}$ dans le four):

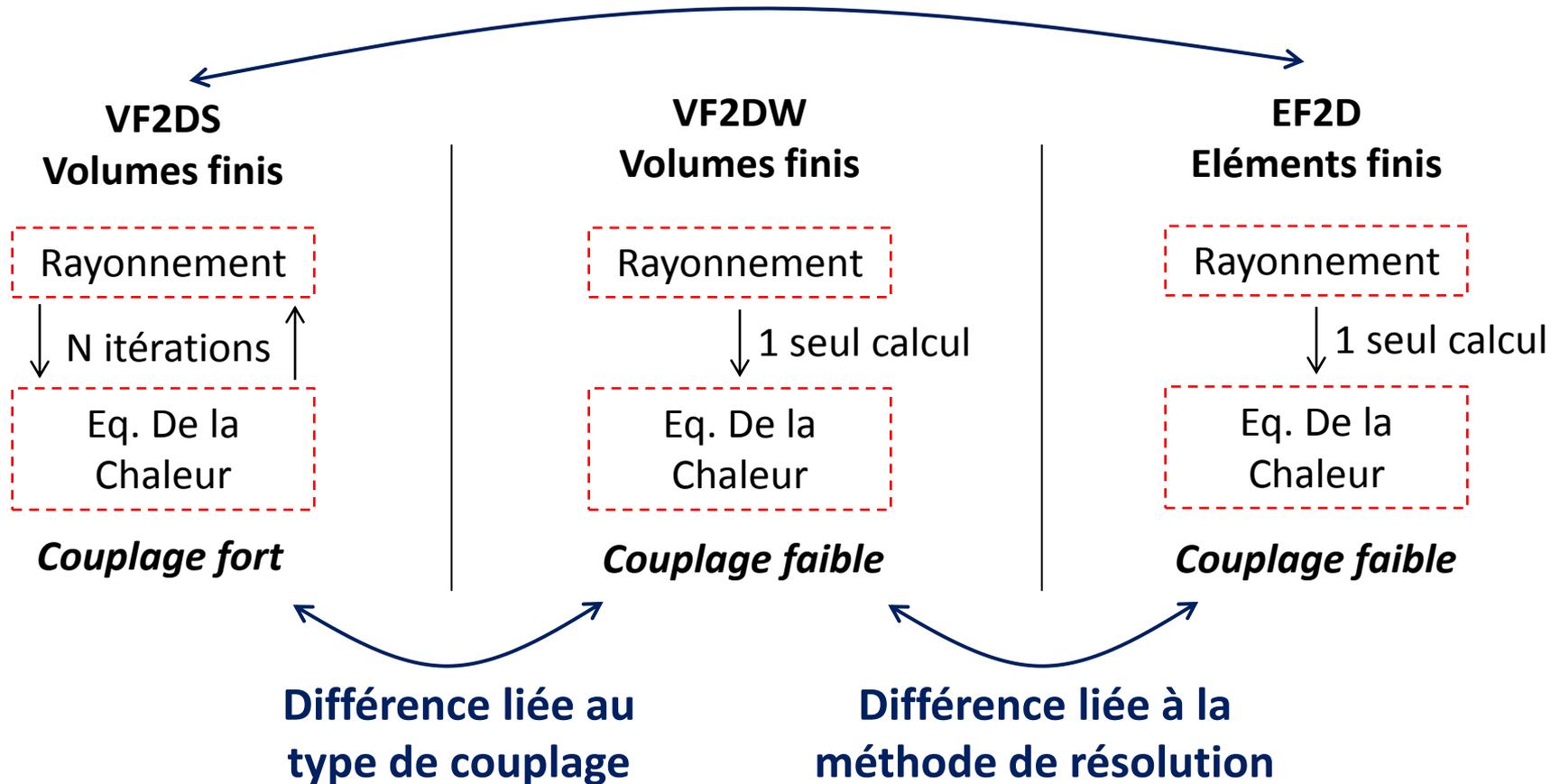


- Milieu gris par bandes :

- 10 bandes de longueurs d'onde dans le domaine semi-transparent [$0,25\mu\text{m}$; $5,25\mu\text{m}$] (Rubin(1985), *Optical properties of soda lime silica glasses for windows*)
- Frontières opaques au-delà de $5,25\mu\text{m}$

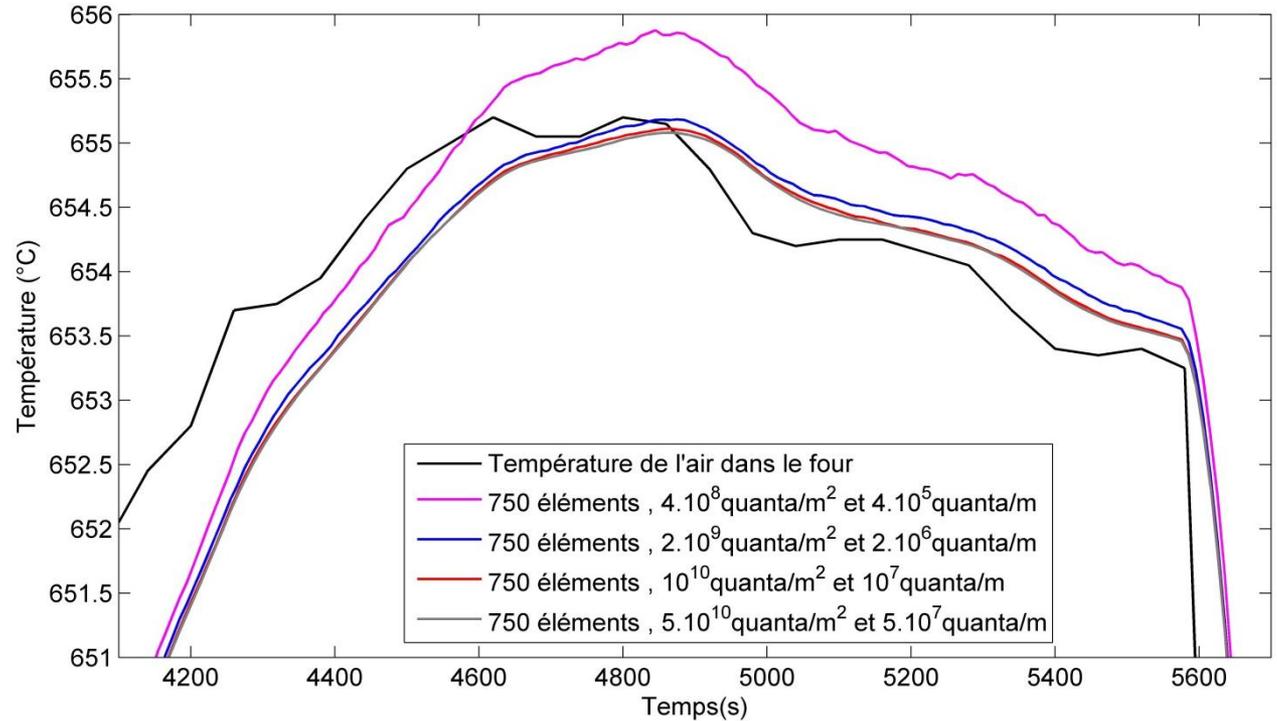
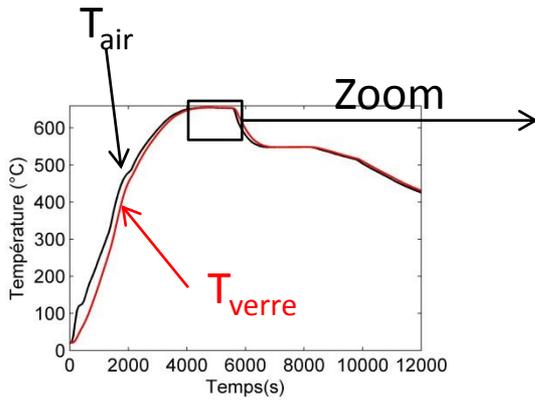
Déclinaison de VF2D en deux versions : VF2DS et VF2DW

Différence liée à la méthode de résolution ou au type de couplage?



Influence du nombre de quanta envoyés

Température moyenne dans la plaque de verre (VF2DS ; $\Delta t = 5s$)



→ A partir de $2 \cdot 10^9$ quanta/m² et $2 \cdot 10^6$ quanta/m, il n'y a plus d'amélioration sensible de la précision lorsque l'on augmente le nombre de lancers.

Temps CPU de la simulation
(PC - DELL T7500) :

4.10 ⁸ quanta/m ²	2.10 ⁹ quanta/m ²	10 ¹⁰ quanta/m ²	5.10 ¹⁰ quanta/m ²
2h	8h	1 jour et 18h	8 jours

Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Chargement thermique

VF2DS et VF2DW

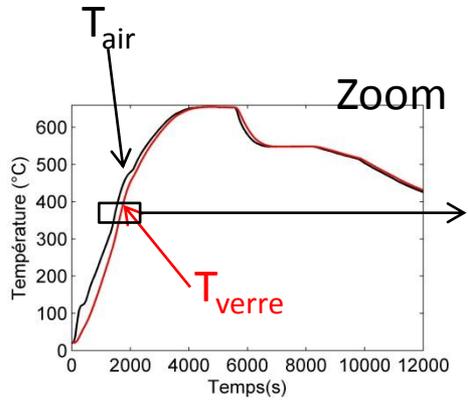
Influence du nombre de quanta

Comparaison couplage fort/faible

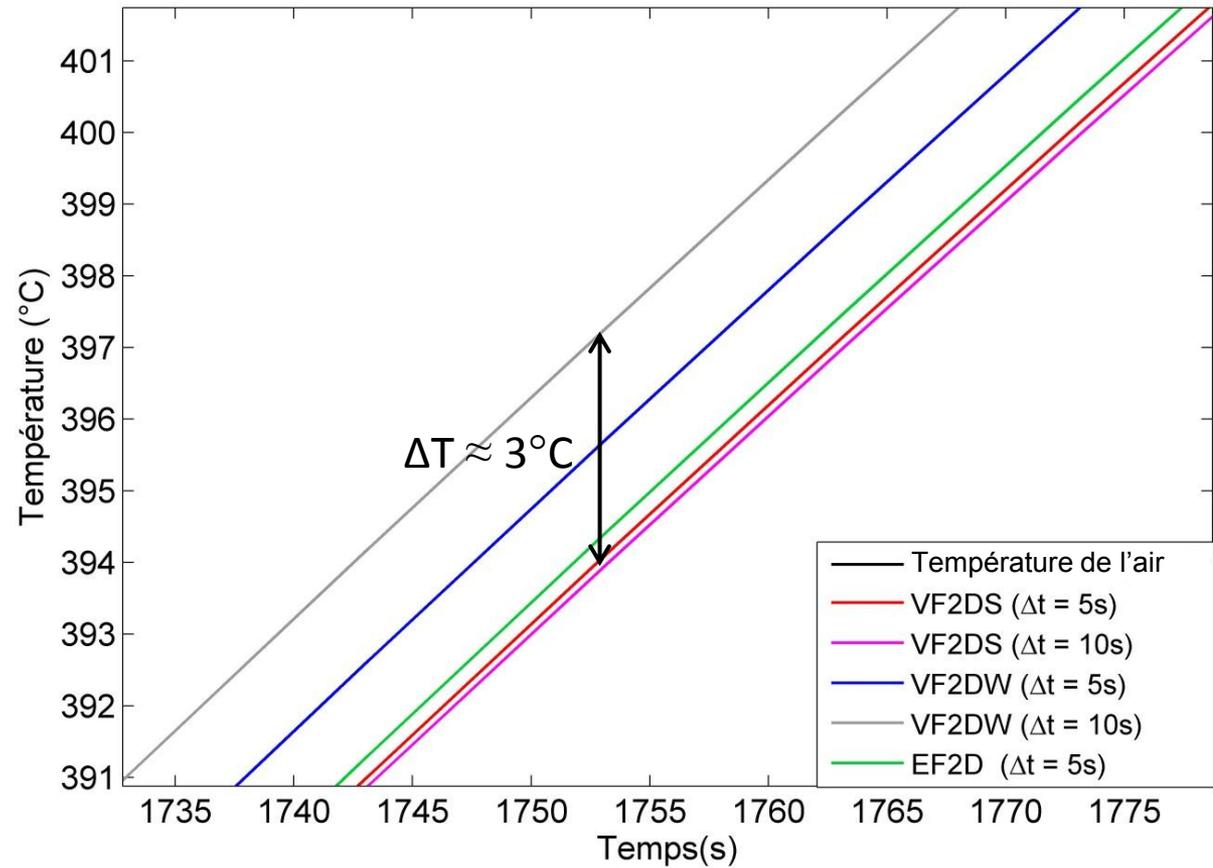
Cas thermomécanique

Comparaison couplage fort / faible et variation Δt

→ Phase de montée

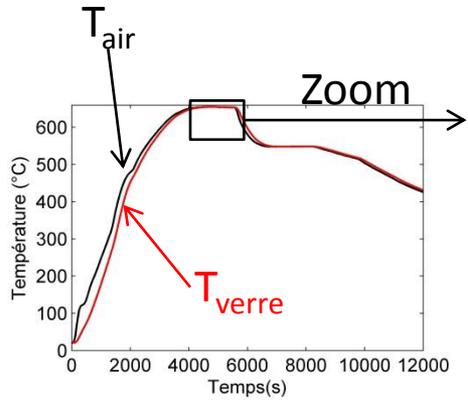


Température moyenne dans la plaque de verre

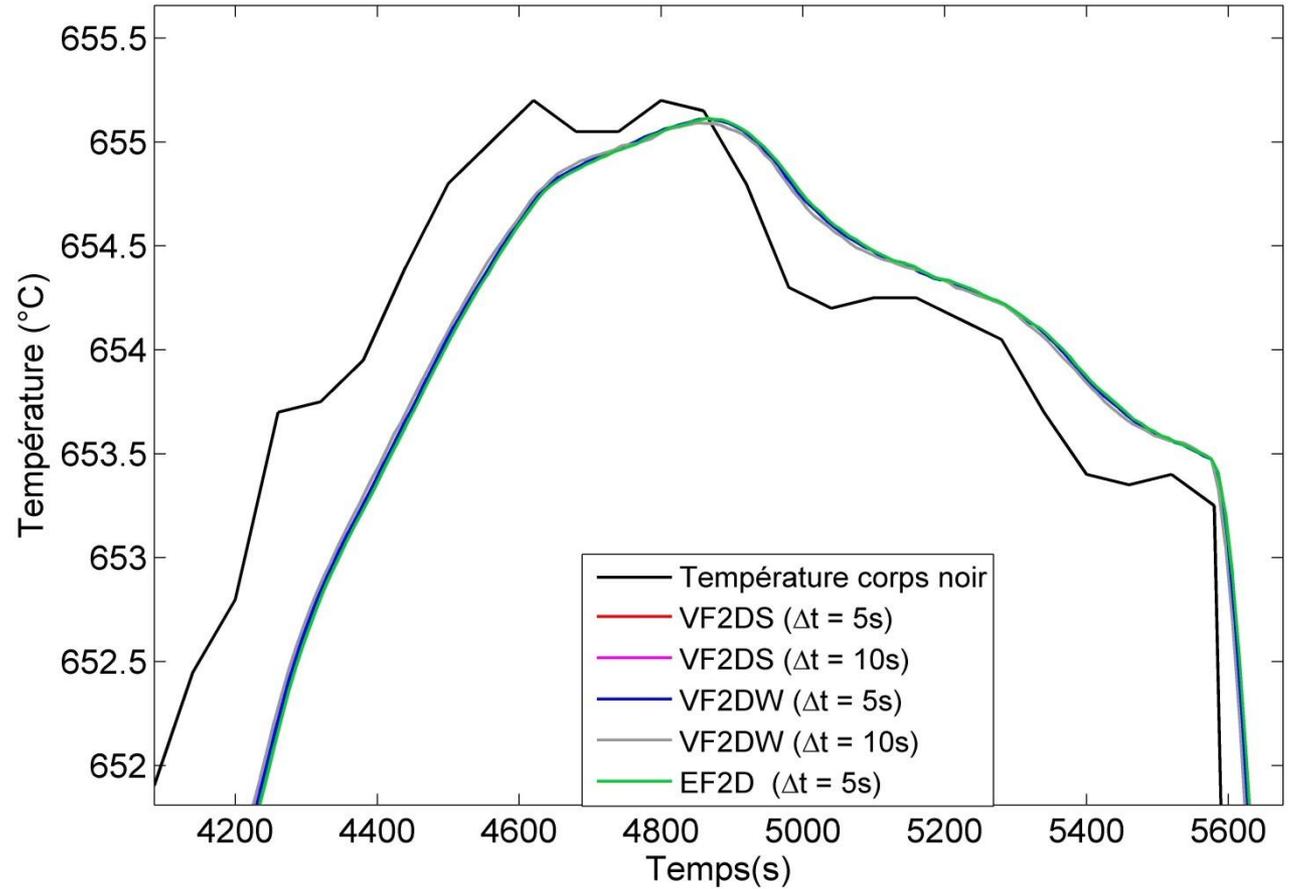


Comparaison couplage fort / faible et variation Δt

→ Phase de palier

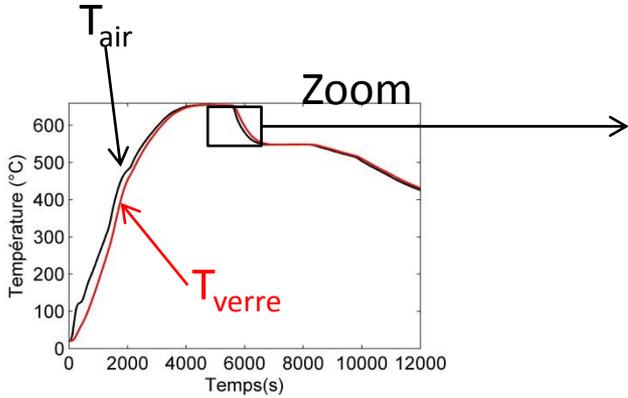


Température moyenne dans la plaque de verre

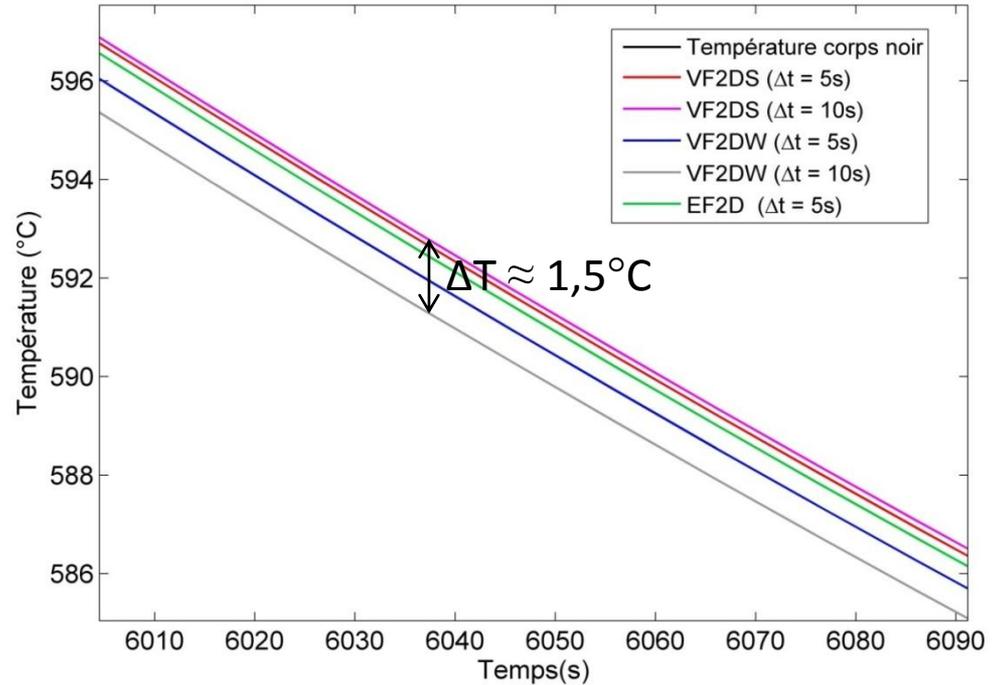


Comparaison couplage fort / faible et variation Δt

→ Phase de descente



Température moyenne dans la plaque de verre



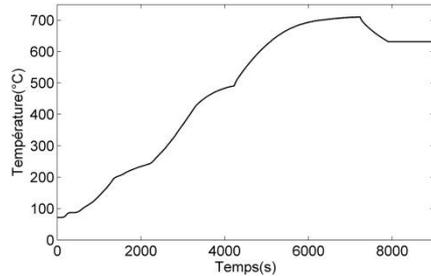
- Le couplage fort VF2DS est proche d'avoir convergé pour $\Delta t = 5s$
- Relativement à l'ordre de grandeur de la température, les écarts entre VF2DS, VF2DW et EF2D sont faibles en prenant $\Delta t = 5s$

Temps CPU de la simulation :	VF2DS ($\Delta t = 5s$)	VF2DS ($\Delta t = 10s$)	VF2DW ($\Delta t = 5s$)	VF2DW ($\Delta t = 10s$)	EF2D ($\Delta t = 5s$)
	1 jour et 18h	1 jour	1 jour et 10h	17h	2 jours et 5h

Modèle élasto-visco-plastique

- Caractéristiques thermiques :
Idem que le cas thermique pur

- Chargement thermique :



- Caractéristiques mécaniques :

$$E = 6,4 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\nu = 0,22$$

$$\alpha = f(T)$$

Séries de Prony* :

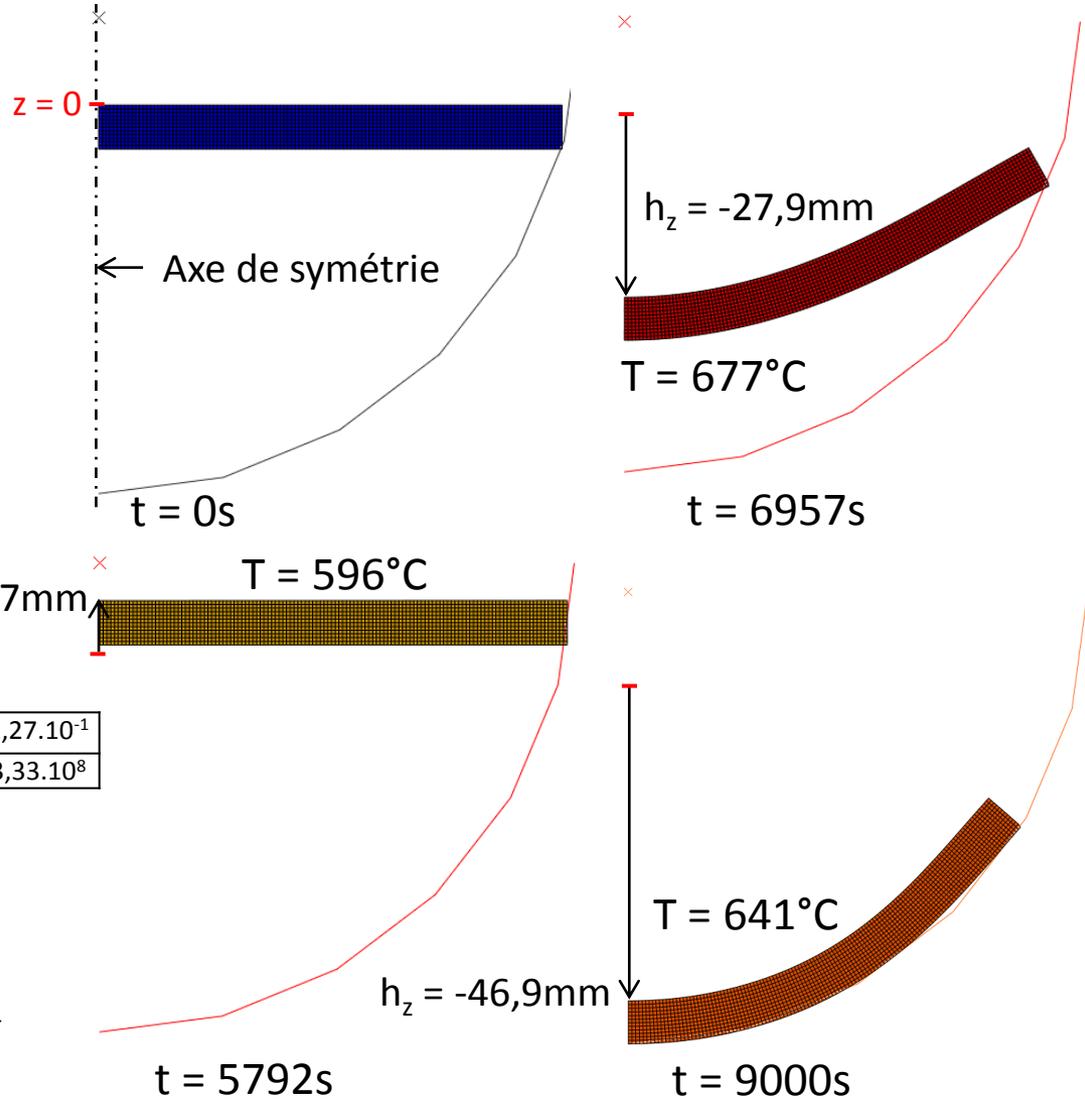
G_i	$5,52 \cdot 10^{-2}$	$8,21 \cdot 10^{-2}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$	$2,29 \cdot 10^{-1}$	$2,86 \cdot 10^{-1}$	$2,27 \cdot 10^{-1}$
τ_i	$6,71 \cdot 10^3$	$1,21 \cdot 10^5$	$1,53 \cdot 10^6$	$1,69 \cdot 10^7$	$7,59 \cdot 10^7$	$3,33 \cdot 10^8$

Loi WLF* :

θ_0	C_1	C_2
400	35	660

- Contact verre/moule glissant

(*Duffrene (1994), *Comportement viscoélastique d'un verre silico-sodo-calcique dans le domaine des températures intermédiaires : approche phénoménologique et modélisation en triaxialité*)



Sommaire

Contexte

Modélisation thermique

Cas de thermoformage

Bilan des résultats

Perspectives

Chargement thermique

VF2DS et VF2DW

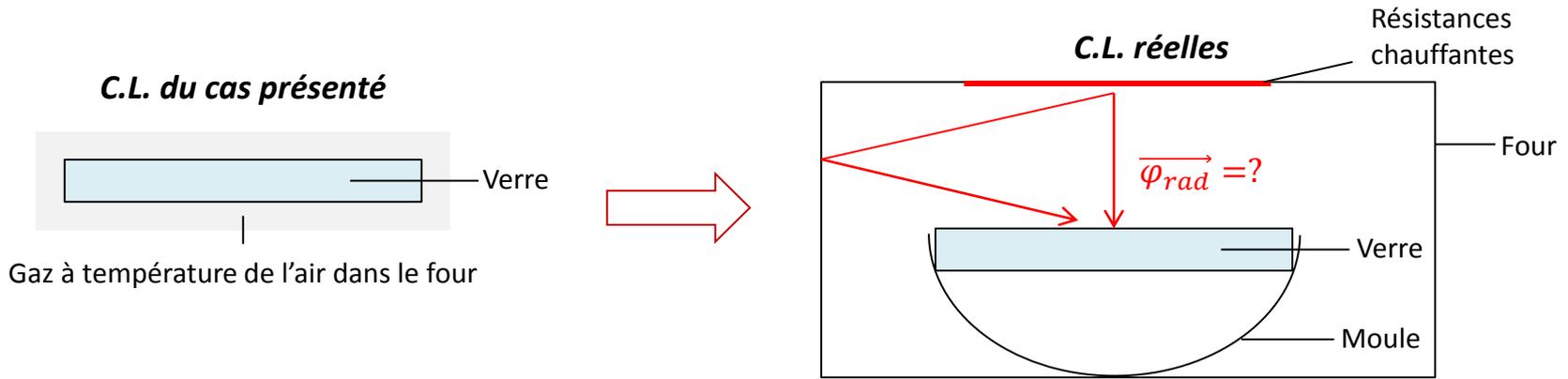
Influence du nombre de quanta

Comparaison couplage fort/faible

Cas thermomécanique

Bilan des résultats

- Développement de 2 codes pour résoudre la thermique :
 - Code EF2D intégré à Abaqus®.
 - Code VF2D pour la comparaison du couplage fort et du couplage faible.
 - Dans un premier temps : déterminer le nombre de quanta à envoyer pour obtenir un rapport précision / temps de calcul satisfaisant.
 - Les résultats des simulations montrent que le choix du couplage fort ou faible influe peu sur la précision des résultats dans notre cas.
- Si le pas de temps choisi est suffisamment petit : le code EF2D offre une précision suffisante pour un pas de temps $\Delta t = 5s$.

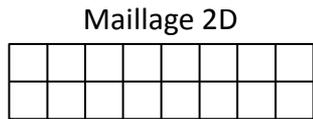


Paramètres constants en fonction de T

$C_p, \rho, \lambda_{cond}, \dots$

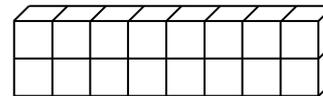
Paramètres déterminés expérimentalement en fonction de T

$C_p(T), \rho(T), \lambda_{cond}(T), n_\lambda(T), k_\lambda(T)$



Thermique

Maillage 3D



Réduire les temps de calcul :

Paralléliser le code Monte-Carlo **dans Abaqus**.
Passer d'une méthode directe à une méthode réciproque?

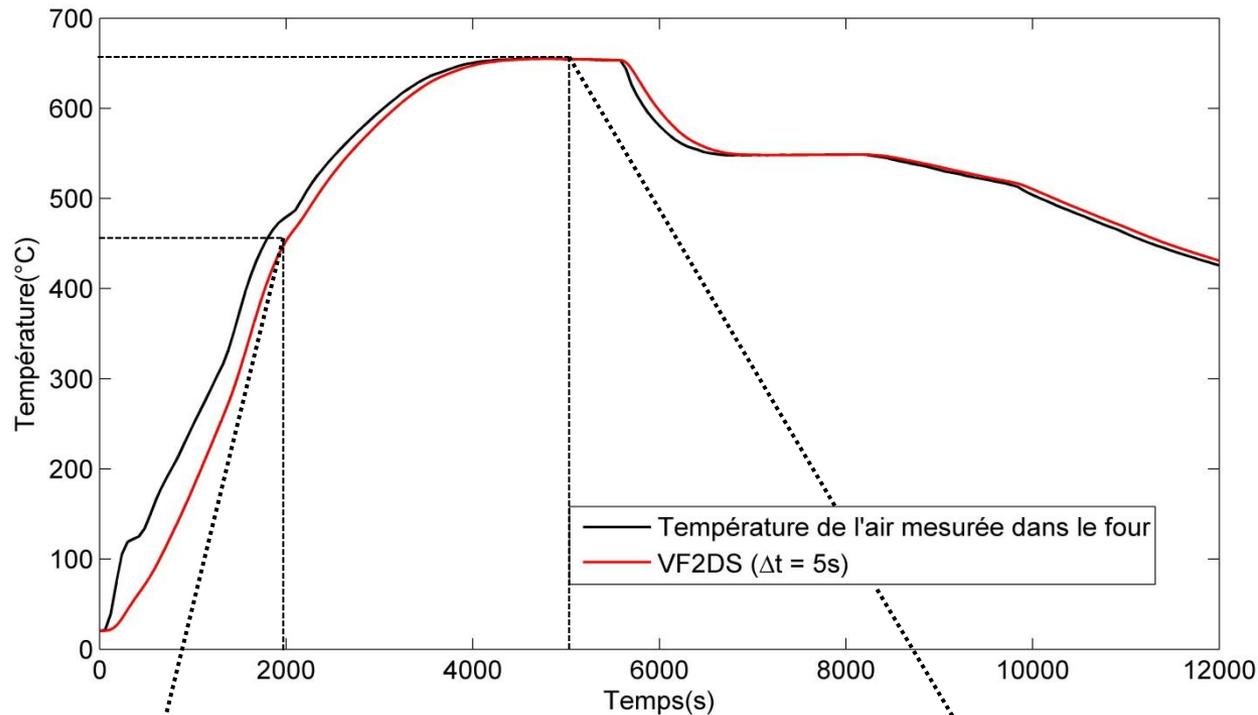
Implémenter les lois élastoviscoplastiques en 2D : déjà réalisée par L. Soudre

Mécanique

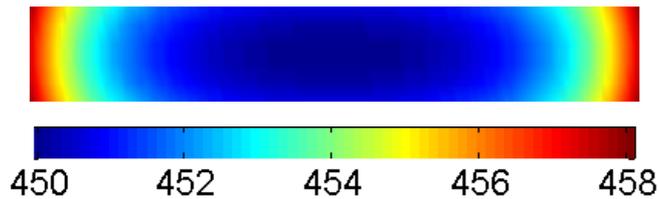
Implémenter les lois élastoviscoplastiques dans Abaqus en 3D

Merci de votre attention

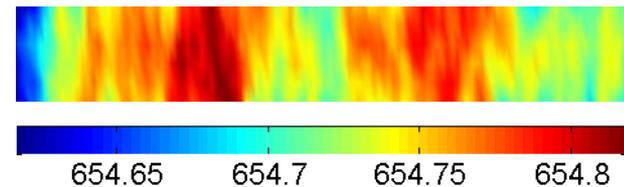
Profil de température dans la plaque de verre



Profil de T à t = 2000s



Profil de T à t = 5000s



Coefficients pris sur chaque bande de longueurs d'onde

$\lambda_0(\mu\text{m})$	n	k
[0,25 ; 0,75]	1,52	$1,3926 \cdot 10^{-7}$
[0,75 ; 1,25]	1,485	$4,7746 \cdot 10^{-6}$
[1,25 ;1,75]	1,463	$3,9391 \cdot 10^{-6}$
[1,75 ; 2,25]	1,447	$4,1380 \cdot 10^{-6}$
[2,25 ; 2,75]	1,428	$5,9683 \cdot 10^{-6}$
[2,75 ; 3,25]	1,41	$7,1620 \cdot 10^{-5}$
[3,25 ; 3,75]	1,395	$1,0584 \cdot 10^{-4}$
[3,75 ; 4,25]	1,375	$9,8676 \cdot 10^{-5}$
[4,25 ; 4,75]	2,352	$2,8648 \cdot 10^{-4}$
[4,75 ; 5,25]	1,324	$2,9842 \cdot 10^{-3}$

(Rubin (1985), *Optical properties of soda lime silica glasses for windows*)