



**HAL**  
open science

## Mesures infrarouges appliquées à la modélisation du thermoformage

Sylvia Andrieu, Fabrice Schmidt, Yannick Le Maoult

► **To cite this version:**

Sylvia Andrieu, Fabrice Schmidt, Yannick Le Maoult. Mesures infrarouges appliquées à la modélisation du thermoformage. Colloque photomécanique 2004, May 2004, Albi, France. p.177-184. hal-01798903

**HAL Id: hal-01798903**

**<https://hal.science/hal-01798903>**

Submitted on 5 Mar 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mesures infrarouges appliquées à la modélisation du thermoformage

**Sylvia Andrieu, Fabrice Schmidt, Yannick Le Maoult**

*Ecole des Mines d'Albi-Carmaux (EMAC),*

*Campus Jarlard, 81000 Albi, France*

*Email : andrieu@enstima.fr, schmidt@enstima.fr, lemaoult@enstima.fr*

---

*RESUME : Le thermoformage est un procédé de mise en forme des matières plastiques. Il comporte une étape de chauffage qui permet d'amener une plaque thermoplastique à une température de formage avant de la déformer au contact d'un moule. La répartition des températures joue un rôle prépondérant sur la distribution des épaisseurs de l'objet thermoformé. Pour comprendre l'interaction entre le rayonnement infrarouge et un polymère, un « démonstrateur de chauffage infrarouge » a été développé. Ainsi, les cartographies d'éclairéments et de températures mesurées ont été confrontées à celles calculées par un solveur thermique basé sur une méthode de lancers de rayons (pour le calcul de l'éclairément) couplée à une approximation de Rosseland (pour la prise en compte du terme source) et à une diffusion 3D.*

---

## 1. Introduction

Le thermoformage comporte une étape de chauffage qui permet d'amener le polymère dans un état thermique favorable à la déformation au contact d'un moule [1]. La distribution de températures engendrée par le chauffage par lampes infrarouges a une influence importante sur la distribution d'épaisseurs de l'objet thermoformé.

Dans l'industrie, souvent le chauffage s'effectue de manière empirique. En effet, les éléments chauffants sont très peu contrôlés. Il s'agit le plus souvent de lampes céramiques (fonctionnant dans l'infrarouge long  $\lambda_{\max} \sim 3 \mu\text{m}$ ) d'inertie importante ( $\sim 10 \text{ mn}$ ). De plus, le temps de chauffage d'un polymère est souvent choisi à partir de tableaux indicatifs peu conventionnels basés sur l'expérience ou de manière arbitraire, « à l'œil », juste au moment où la plaque commence à fluer sous l'effet de la chaleur. Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude sont reliés à l'optimisation de l'étape de chauffage. Dans un premier temps, il s'agit de comprendre l'interaction entre le rayonnement infrarouge et la matière. Nous présenterons dans ce qui suit successivement :

- La caractérisation du four infrarouge
- La caractérisation des propriétés physiques de plaques extrudées de PS de couleur blanche.
- Les résultats issus des simulations numériques

## 2. Caractérisation du four infrarouge

### 2.1. Le démonstrateur de chauffage infrarouge

Le démonstrateur de chauffage infrarouge a été développé dans le but de comprendre l'interaction du rayonnement infrarouge avec la matière thermoplastique au cours du processus de thermoformage. Les thermoformeuses, à cause de leur conception, ne permettent pas de mesurer les répartitions de température de la feuille au cours du chauffage. Le démonstrateur rend cette mesure possible et il permet d'optimiser le chauffage de la feuille par la répartition spatiale et la régulation des lampes.

Le démonstrateur est constitué d'une structure d'aluminium (1) qui supporte un four infrarouge (2) régulé en puissance par une armoire électrique (3). Un cadre métallique (4) serre une feuille thermoplastique (5). La structure aluminium a été conçue de manière à pouvoir modifier la distance entre la feuille thermoplastique et les lampes infrarouges (fixée à 15 cm dans notre expérience). Un miroir d'aluminium poli (6) (de coefficient de réflexion spéculaire mesuré égal à 98%) est disposé à 45° sous la feuille pour mesurer les températures de la surface inférieure de la feuille qui n'est pas directement exposée au rayonnement (« surface arrière ») à l'aide d'une caméra infrarouge AGEMA 880 LW (7).

Un pyromètre (8) THERMALERT TXS est disposé en « surface avant » pour réaliser une mesure locale de température par le biais d'un miroir aluminium poli (9) et d'un orifice dans le four. De cette manière, on peut avoir une indication locale du gradient de température.

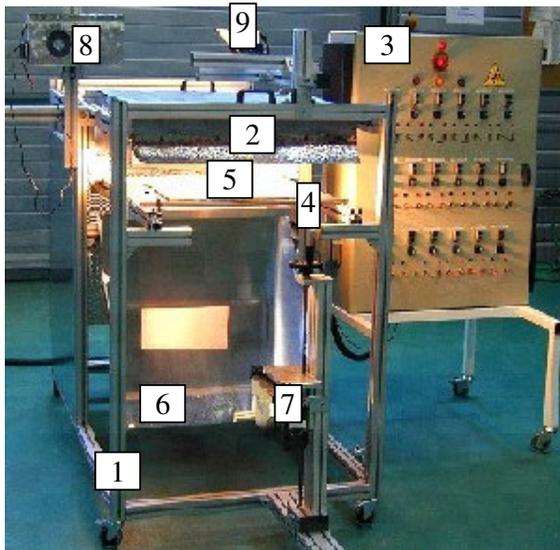


Figure 1 : Démonstrateur de chauffage infrarouge

Un four a été développé à l'EMAC qui permet de disposer 18 lampes halogènes (Philips) SK15 de longueur 370 mm. Les lampes sont espacées entre elles de 80 mm et disposées en deux rangées décalées. Cet entraxe a été optimisé par des simulations numériques [2]. Le four halogène étudié est constitué de 12 lampes infrarouges de 500W (13169Z CLEAR Philips). Le schéma du four permet de voir la disposition des lampes par rapport à la feuille thermoplastique de dimensions 350 mm x 350 mm qui sont les valeurs choisies dans le cadre de l'étude. On peut voir l'emplacement de l'orifice du four qui sert de zone de contrôle de la température avec le pyromètre.

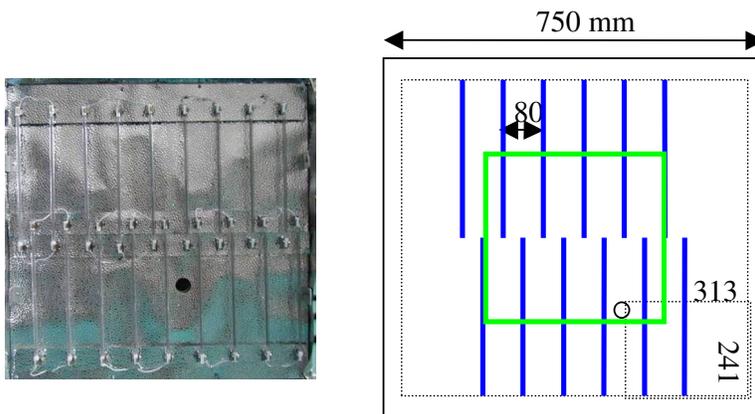


Figure 2 : Four infrarouge halogène

## 2.2 Mesures d'éclairement

La société Philips située à Pont-à-Mousson possède un banc XY qui permet de mesurer l'éclairement d'une source d'énergie par le biais d'un fluxmètre de Gardon MEDTHERM 64 fonctionnant dans la gamme de longueurs d'onde 0,6 à 15  $\mu\text{m}$ . La mesure d'éclairement a été effectuée à 15 cm du four sur une surface de 1200 mm x 1200 mm centrée par rapport au four. Le pas de mesure est de 3 cm, de cette façon 1681 points (41 \* 41) de mesure ont été effectués.

Dans la figure qui suit est représentée la cartographie d'éclairement ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) sur la surface de la feuille thermoplastique. Chaque couleur correspond à une gamme d'éclairements.

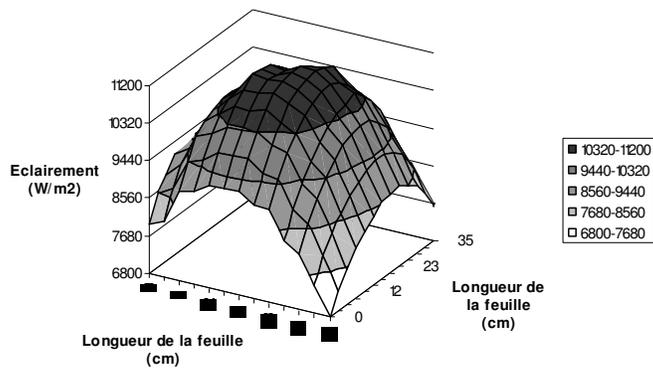


Figure 3 : Eclairement mesuré à l'aide du banc XY et d'un fluxmètre de Gardon

Les éclairements moyen, minimum et maximum sur une surface associée aux dimensions de la feuille thermoplastique sont portés dans le tableau suivant :

Eclairement moyen (W/m <sup>2</sup> )	Eclairement minimum (W/m <sup>2</sup> )	Eclairement maximum (W/m <sup>2</sup> )	Ecart-type
9612	6803	11120	982

Il faut prendre en compte l'interaction entre le rayonnement infrarouge et le polymère, pour cela, nous avons étudié les propriétés physiques du polymère.

### 3. Caractérisation des plaques extrudées de PS blanc

Dans le cadre de l'étude, nous voulions assurer la reproductibilité des résultats. Pour cela, nous avons choisi d'extruder des plaques thermoplastiques pour contrôler les paramètres d'extrusion. L'extrudeuse utilisée est une machine italienne OMV D120 dont le diamètre de la tête de filière est 120 mm.

Lors de la campagne d'extrusion, une vitesse d'extrusion de 150 kg/h a été choisie pour des petites quantités de matière. Le PS choc extrudé est un mélange de 50% de granulés PS cristal EMPERA 251 et de 50% de PS choc EMPERA 622 avec 2% en masse de pigments blancs.

<b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1040
<b>Conductivité thermique (W/m.K)</b>	0,16

Le polymère choisi dans cette étude est un PS de couleur blanche sous forme de plaques extrudées d'épaisseur 1mm. Pour thermoformer une plaque on cherche à atteindre la température de formage. Les températures de formage suivantes sont issues de la littérature [3]:

<b>Gamme de températures de formage (°C)</b>	127-182
<b>Température normale de formage (°C)</b>	149

#### 3.1 Propriétés optiques

Un spectromètre infrarouge Perkin-Elmer (FT-IR) fonctionnant dans la gamme de longueurs d'onde 1-25 μm a été utilisé pour mesurer les propriétés optiques du polymère étudié. Deux modes d'analyses ont été utilisés, il s'agit d'une mesure par transmission et une autre par réflexion spéculaire [4].

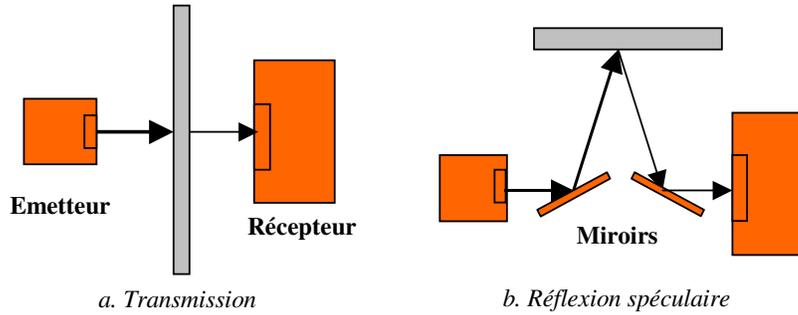


Figure 4:  
Transmission et  
réflexion spéculaire

La mesure par réflexion spéculaire, effectuée à température ambiante, donne le coefficient de réflexion  $r_\lambda$  associé à chaque longueur d'onde  $\lambda$ . Le coefficient de réflexion moyen  $r(T)$  a été calculé pour la gamme de longueurs d'onde de 1 à 25  $\mu\text{m}$  selon la formule suivante où  $L_\lambda^0$  est la loi de Planck:

$$r(T) = \frac{\int r_\lambda L_\lambda^0(T) d\lambda}{\int L_\lambda^0(T) d\lambda} \quad (1)$$

Le coefficient de réflexion est faible en général pour les polymères. En l'occurrence, il est égal à 3,5%.

La mesure spectrométrique en transmission, effectuée à température ambiante, donne le coefficient apparent de transmission spectrale  $T_\lambda$  en fonction de la longueur d'onde. Le coefficient de transmission moyen est calculé pour la gamme de longueurs d'onde de 1 à 25  $\mu\text{m}$  de la manière que le coefficient de réflexion moyen :

$$\bar{T}(T) = \frac{\int T_\lambda L_\lambda^0(T) d\lambda}{\int L_\lambda^0(T) d\lambda} \quad (2)$$

Le coefficient de transmission moyen  $\bar{T}(T)$  est de 0,1%, cette valeur est caractéristique d'un polymère fortement opaque.

Le coefficient de transmission spectrale  $T_\lambda$  est fortement lié à l'épaisseur de l'échantillon. Pour connaître le coefficient d'absorption de ce polymère opaque des échantillons ont été découpés avec un microtome (microtome rotatif HM 355 MICROM) à la température ambiante. Les échantillons obtenus ont des épaisseurs variant de 10 à 100  $\mu\text{m}$ . La méthode de découpe d'échantillons par microtome permet d'obtenir la profondeur de pénétration du rayonnement dans le polymère. De cette façon, on peut obtenir une propriété optique du polymère indépendante de l'épaisseur qui est le coefficient d'absorption du matériau. On se base sur la loi de Beer-Lambert qui décrit le coefficient de transmittivité  $\tau_\lambda$  dans une direction donnée comme une exponentielle décroissante :

$$\tau_\lambda = e^{-K_\lambda d} \quad (3)$$

où  $d$  est l'épaisseur de l'échantillon et  $K_\lambda$  est le coefficient d'absorption de l'échantillon (en  $\text{m}^{-1}$ ).

La relation qui lie le coefficient de transmission spectrale  $T_\lambda$  et le coefficient de transmittivité  $\tau_\lambda$  est la suivante :

$$T_\lambda = \tau_\lambda \frac{1 - \rho_\lambda}{1 + \rho_\lambda} \quad (4)$$

L'équation (4) peut être réécrite sous la forme :

$$-\ln T_\lambda = K_\lambda d + C_\lambda \quad (5)$$

On voit ainsi que le coefficient d'absorption  $K_\lambda$  est une grandeur indépendante de l'épaisseur de l'échantillon. En effet pour obtenir  $K_\lambda$ , on trace pour chaque longueur d'onde l'opposé du logarithme du coefficient de transmission  $T_\lambda$  en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. Le coefficient d'absorption  $K_\lambda$  est obtenu en calculant la pente de la droite obtenue pour chaque longueur d'onde.

L'émissivité du polymère dans la gamme de longueur d'ondes 8-14  $\mu\text{m}$  associée à la caméra infrarouge est calculée par le biais du principe de la conservation de l'énergie permet de lier la réflectivité  $r_\lambda$ , la transmittivité  $\tau_\lambda$  et l'absorptivité  $\alpha_\lambda$ :

$$r_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda = 1 \quad (6)$$

La relation entre l'émissivité et l'absorptivité est conditionnée par la loi de Kirchhoff à l'équilibre thermique:

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (7)$$

De cette manière, on obtient l'émissivité qui est obtenue par la formule suivante :

$$\varepsilon_\lambda = 1 - T_\lambda \frac{1 + \rho_\lambda}{1 - \rho_\lambda} - \rho \quad (8)$$

Ainsi l'émissivité du polymère qui sera utilisée dans les mesures thermographiques [5] est de 0,96.

### 3.2 Chauffage infrarouge de plaques extrudées

Sur la figure suivante sont portées les températures mesurées à l'aide du pyromètre et de la caméra au cours du chauffage infrarouge par 12 lampes halogène d'une plaque de 1mm d'épaisseur de PS blanc. Le pyromètre effectue une mesure locale de la température en surface avant de la feuille thermoplastique. La caméra effectue une cartographie de températures sur la surface arrière. On peut toutefois calculer des températures moyennes dans des zones données. Ainsi, la légende caméra ( $T^\circ$  locale) donne la température dans la zone correspondant à la visée du pyromètre en surface arrière et caméra ( $T^\circ$  moyenne) la température moyenne sur toute la surface de la feuille. On peut constater que compte tenu de l'excentricité de l'orifice du four par rapport au centre de la feuille, il y a correspondance entre la température moyenne et la température « locale ».

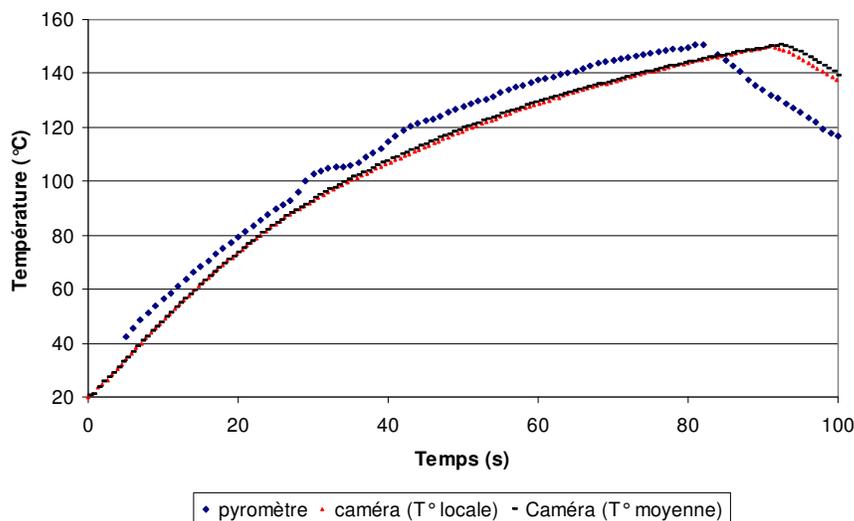


Figure 5 :  
Températures  
expérimentales

Les températures des deux surfaces de la feuille suivent la même allure. On peut noter que le gradient thermique entre la surface « avant » et « arrière » est de l'ordre de 10°C. Ceci s'explique par la diffusion thermique dans le polymère.

## 4. Simulations numériques

### 4.1 Méthode du lancer de rayons

Pour prendre en compte les réflecteurs des lampes infrarouge, une méthode de calcul d'éclairement par lancer de rayons a été développée par le laboratoire. Cette méthode donne des résultats précis pour la prise en compte du rayonnement [6].

La puissance d'une lampe[7] est calculée à l'aide de la formule suivante:

$$q = \varepsilon_w \sigma T_w^4 S_w \quad (9)$$

$\varepsilon_w$  est l'émissivité,  $T_w$  la température et  $S_w$  la surface latérale du filament de tungstène,  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann. On trouve une puissance calculé de 473W pour une lampe de puissance électrique 500W.

Les surfaces latérales des lampes sont discrétisées en un nombre de points sources sur la longueur et la circonférence des lampes (4800 points). A partir de chaque point source un nombre de rayons (3481 rayons) est envoyé de manière isotrope dans un demi hémisphère tangent à la lampe. La trajectoire de chaque rayon est calculée (émission, réflexion, absorption). Une réflexion de type diffuse a été prise en compte pour le réflecteur plan martelé qui se situe à l'arrière des lampes avec un coefficient de réflexion de 80%. La réflexion diffuse se caractérise par une redistribution isotrope d'un rayon incident dans un demi hémisphère tangent au réflecteur plan. Dans la simulation numérique, nous avons pris en compte une redistribution de 3481 rayons.

Les éclairagements moyen, minimum et maximum calculés sur la surface de la feuille sont notés dans le tableau suivant :

	Eclairement moyen (W/m <sup>2</sup> )	Eclairement minimum (W/m <sup>2</sup> )	Eclairement maximum (W/m <sup>2</sup> )
Erreur relative (%)	9592	7676	10989
	0,2	12,7	1,2

L'éclairement moyen calculé par lancer de rayons est infiniment proche de l'expérimental ainsi que l'éclairement maximum. Par contre, l'erreur relative est de 12,7% pour l'éclairement minimum qui est aussi celui des bords de la feuille. Ceci peut être expliqué par le fait que l'on n'a pas pris en compte les bords du four dans le calcul des réflexions et on a considéré une diffusion isotrope du réflecteur.

### 4.2 Approximation de Rosseland

Pour ne pas alourdir les temps de calculs, l'approximation de Rosseland [8,9] peut être utilisée à la suite du calcul de l'éclairement pour traiter l'approche volumique de l'absorption du rayonnement dans la matière.

Cette approximation permet d'écrire le flux radiatif de la même manière que le flux conductif pour un milieu optiquement épais:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{q}(\vec{r}) = -\vec{\nabla} \cdot (k_{Ross} \cdot \vec{\nabla} T(\vec{r})) \quad (10)$$

La conductivité radiative (ou conductivité de Rosseland)  $k_{Ross}$  s'écrit :

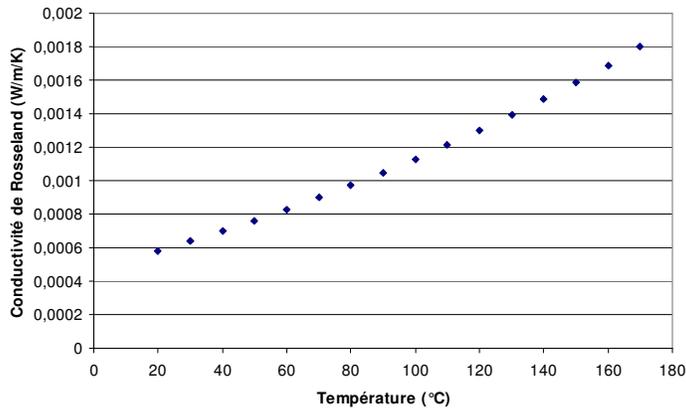
$$k_{Ross} = \frac{16\sigma}{3\bar{K}_{Ross}(T)} T^3 \quad (11)$$

Le coefficient d'absorption de Rosseland  $\bar{K}_{Ross}(T)$  est obtenu en fonction de la température par la formule suivante en intégrant sur la fréquence:

$$\frac{1}{\bar{K}_{Ross}(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{\kappa(\nu)} \frac{dB(T, \nu)}{dT} d\nu}{\int_0^{\infty} \frac{dB(T, \nu)}{dT} d\nu} \quad (12)$$

Le coefficient et la conductivité de Rosseland sont calculés à partir des mesures de spectrométrie infrarouge qui ont permis d'obtenir le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde.

Pour le PS blanc, on obtient une conductivité de Rosseland qui croît en fonction de la température. On peut noter que la conductivité radiative est faible par rapport à la conductivité thermique qui a été déterminée par une méthode du ruban chaud. Celle-ci est égale à 0,18 W/m/K. Ceci révèle l'opacité du polymère



Couplée à l'approximation de Rosseland, on a utilisé un solveur thermique basé sur une méthode de volumes de contrôle que nous avons adapté à notre problème.

#### 4.2 Méthode de volume de contrôle

Le solveur thermique utilisé a été développé par le laboratoire [10,11]. Le terme source calculée à l'aide du lancer de rayons a été pris comme condition aux limites. Un coefficient de convection  $h=8\text{W/m}^2/\text{K}$  a été appliqué aux surfaces de la feuille.

Sur la figure suivante, nous avons réalisé une étude de sensibilité de la capacité calorifique sur la température issue des simulations numériques comparée à la température moyenne donnée par la caméra.

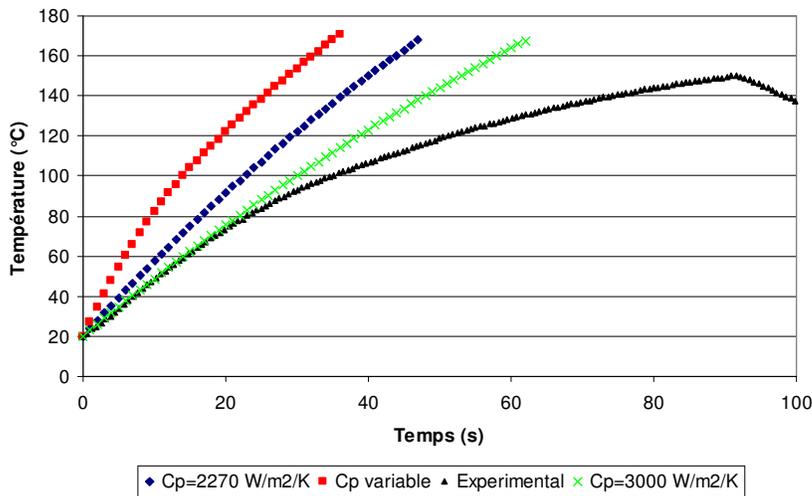


Figure 6 : Confrontation mesures expérimentales-simulations numériques.

Nous avons appliqué une capacité calorifique constante comme on la retrouve souvent dans la littérature ainsi qu'une capacité calorifique variable en fonction de la température [3]. On observe que la capacité calorifique influe fortement sur la température moyenne de la feuille.

## 5. Conclusions

Une méthode de calcul d'éclairement par lancer de rayons a été utilisée pour prendre en compte le réflecteur qui se situe à l'arrière des lampes halogène que nous avons utilisées. Cette méthode donne de bons résultats en terme d'éclairement moyen en comparaison avec une mesure d'éclairement réalisée à l'aide d'un fluxmètre de Gardon.

Un démonstrateur de chauffage infrarouge a été développé dans le but de valider les modèles numériques. Il permet de réaliser des cartographies de températures à l'aide d'une caméra infrarouge et d'un pyromètre.

Une approximation de Rosseland a permis de démontrer l'opacité du polymère utilisé qui est du PS de couleur blanche. Un solveur thermique permet de réaliser un calcul de température sur la surface de la feuille et dans l'épaisseur par une méthode de volumes de contrôle.

Nous sommes en train de mesurer la capacité thermique du polymère par calorimétrie différentielle à balayage, cette mesure nous permettra de valider notre approche.

## 6. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les sociétés Philips Eclairage et EDF R&D pour leur support financier et technique ainsi que Georges Nepsinski, Ludivine Moga et Guilhem Bocquet de l'EMAC pour leur contribution à ce travail.

## 7. Références

- [1] Adolf Illig, *Pratique du thermoformage*, publisher: Hermès sciences, 1999
- [2] S. Andrieu, F. Schmidt, Y.L. Maoult, PPS 18, Guimaraes, Portugal (2002)
- [3] J. L. Throne, *Technology of thermoforming*, Hanser/Gardner Publications, 1996
- [4] *Techniques de l'ingénieur*, M. Chatain et P. Hervé, A3145-1 à 26
- [5] *Techniques de l'ingénieur*, Thermographie infrarouge, R 2740, D. Pajani et P. Bremond
- [6] Wen Cai, thèse de l'Ecole des Mines de Paris, Doctorat en énergétique, 16 Janvier 1992
- [7] *La transmission de la chaleur*, André B. De Vriendt, Volume 1, Tome 1, Gaëtan Morin Editeur , 1984
- [8] M.F. Modest, *Radiative heat transfert*, McGraw-Hill, Inc, 1993
- [9] **Verre**
- [10] Serge Monteix, Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 2 février 2001
- [11] S. Monteix, F. Schmidt, Y. Le Maoult, R. Ben Yedder, R.W. Dirrado, D. Laroche, *Experimental study and numerical simulation of preform or sheet exposed to infrared radiative heating*, *Journal of Materials Processing Technology*, **119**, pp. 90-97 (2001)