



HAL
open science

Thermographie infrarouge appliquée à la mise en forme des bouteilles en P.E.T.

Serge Monteix, Yannick Le Maout, Fabrice Schmidt, Jean-Paul Arcens

► **To cite this version:**

Serge Monteix, Yannick Le Maout, Fabrice Schmidt, Jean-Paul Arcens. Thermographie infrarouge appliquée à la mise en forme des bouteilles en P.E.T.. Thermogram' 2001, Oct 2001, Lieusaint, France. p.247-256. hal-01798925

HAL Id: hal-01798925

<https://hal.science/hal-01798925>

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.

THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUEE A LA MISE EN FORME DES BOUTEILLES EN P.E.T

Serge Monteix^(*), Y. Le Maoult^(*1), F. Schmidt^(*), J.P Arcens^(*)

^(*)Ecole des Mines d'Albi-Carmaux Campus Jarlard, Route de Teillet, 81013 ALBI CT Cedex 09 (France)

(1) e-mail : lemaoult@enstimac.fr

Résumé

Le procédé de mise en forme des bouteilles par injection-soufflage à partir de préformes en Poly-Ethylène Téréphtalate (P.E.T), procédé qui représente 40 % de la totalité des emballages de boisson au niveau mondial, nécessite une étape de chauffage afin d'amener la température des préformes initialement à la température ambiante, à une température voisine de 100°C. Cette étape de chauffage détermine la répartition des températures dans la matière et de ce fait conditionne la qualité des bouteilles et leurs coûts de fabrication. Dans ce contexte, l'objectif de l'étude présentée dans cet article est liée à l'optimisation du fonctionnement de ces installations industrielles de chauffage, dont le rendement a été mesuré entre 15 et 20%. La méthodologie mise en place repose sur une modélisation 3D des températures au moyen du logiciel « Plastirad » développé spécialement afin de déterminer, en fonction de l'ensemble des paramètres de l'étape de chauffage, les gradients de températures établis sur la hauteur et dans l'épaisseur des préformes. L'étude numérique a été validée par différentes expérimentations :

- Modèle de terme source infrarouge (lampe halogène), calcul et validation des températures du filament et du quartz.
- Propriétés thermo-optiques du P.E.T (coefficient d'absorption du rayonnement et émissivité).
- Coefficient d'échange convectif sur la hauteur des préformes et mesures de température de surface sur celles ci.

Pour chacun de ces points, des mesures par thermographie infrarouge ont été effectuées. C'est donc principalement ces mesures qui sont présentées ici.

Introduction

Le procédé de fabrication des bouteilles en P.E.T comporte trois étapes. La première consiste à fabriquer les préformes par injection; La deuxième étape correspond au conditionnement thermique qui permet d'amener leur température aux environs de 100°C. La troisième étape consiste, à l'aide d'actions mécaniques d'étirage et de soufflage à donner à la préforme son aspect définitif correspondant à celui de la bouteille [1]. Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude sont liés à l'étape de chauffage. Ils visent à optimiser les rendements très faibles qui ont été mesurés sur les installations industrielles de chauffage. Ces niveaux très faibles résultent de l'utilisation d'émetteurs infrarouges courts destinés à chauffer des préformes (tubulaires) en PET qui présentent une conductivité faible ($\approx 0.25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) et de deux contraintes résultant du procédé de fabrication lui même :

- La première concerne la température extérieure des préformes qui ne doit pas dépasser 130°C, cette température correspond à la température de cristallisation du P.E.T (le P.E.T devient alors opaque).
- La deuxième contrainte se traduit par la nécessité de développer sur l'épaisseur des préformes une distribution de température croissante depuis la face externe vers la face interne des préformes, afin d'éviter certains défauts de fabrication qui se développent sans l'application de ces précautions.

Afin de garantir ces conditions les utilisateurs ajustent les paramètres de fonctionnement des installations de chauffage qui sont composés de plusieurs fours (entre 2 et 10) comprenant chacun 9 lampes halogènes avec des réflecteurs de rayonnement et un système de ventilation. Les réglages se

font de manière empirique et donc se traduisent par un cheminement long et coûteux. Les figures 1 et 2 présentent la configuration classique d'un four de chauffage ainsi qu'un cycle de mise en température d'une préforme en PET avant l'étape de soufflage:

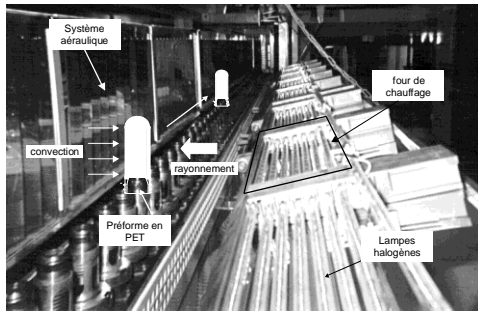


Figure 1

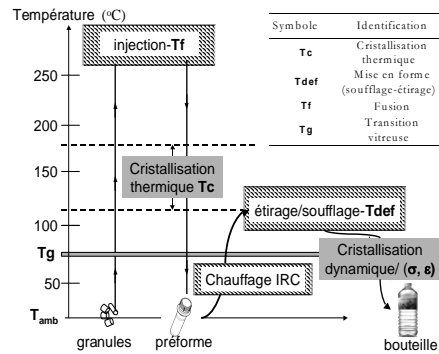


Figure 2

Nous présentons dans ce qui suit, trois études mettant en œuvre la thermographie infrarouge à différents niveaux de l'étape de chauffage. Dans l'ordre nous trouverons :

- 1) Etude des températures du terme source : les lampes halogènes.
- 2) Faisabilité des mesures de température de surface sur la préforme en PET.
- 3) En Tenant compte des mesures du (2), mesure du coefficient d'échange convectif selon la hauteur de la préforme.

Matériel utilisé lors des campagnes de mesures

Sur la figure 3, on peut voir un four infrarouge comportant six lampes de 1000 W pilotables individuellement à l'aide de gradateurs de puissance, celui ci comporte également un dispositif de mise en rotation de la préforme et un dispositif permettant l'acheminement de celle ci devant les lampes ainsi qu' un ventilateur destiné à refroidir la surface de la préforme. Le matériel de mesures se compose d'une caméra AGEMA 880 LW dont la bande spectrale se situe entre 8 et 12 μm . Cette caméra est reliée à un système d'acquisition des thermogrammes dont la résolution de conversion est de 12 bits. Le format des images thermographiques est de 280 points par 280 lignes. Le fonctionnement de ce type de caméra est bien décrit dans [2]. La caméra, avant les expérimentations, fut étalonnée sur la gamme 50-180°C à l'aide d'un corps noir LAND (50-550 °C). Nous avons également utilisé une centrale d'acquisition de données thermocouples (J) basée sur un multimètre Keithley à haute résolution. Ces thermocouples ont permis la mesure des températures d'air dans le four ainsi que la température de l'air à l'intérieur d'une préforme pendant la phase de chauffage; ces données étant utilisées comme condition aux limites thermiques dans le logiciel « Plastirad ».

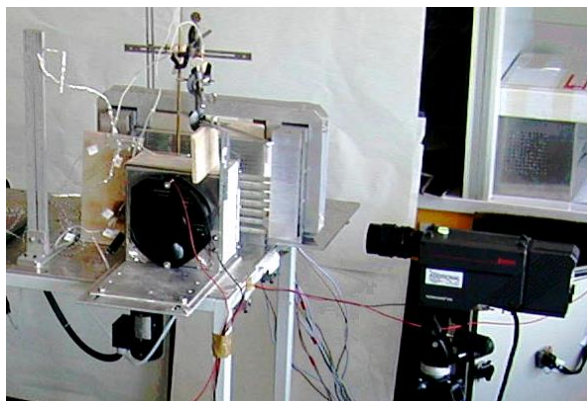


Figure 3

1) Températures des lampes (Modèle de calcul et validation expérimentale)

la lampe halogène est composée d'un filament en tungstène spiralé de 1450 μm de diamètre enfermé dans un tube en quartz de 10 mm. La longueur totale de la lampe atteint 300 mm. Le tube en quartz contient de l'argon. Le calcul prend donc en compte deux sources distinctes : le filament et le quartz qui ne rayonnent pas à la même température et donc pas dans les mêmes domaines de longueurs d'ondes. La figure 4 présente de manière simplifiée les étapes de calcul qui permettent d'obtenir T_{quartz} et T_{filament} , il s'agit d'un bilan thermique faisant appel aux transferts convectif, radiatif et conductif (dans le gaz neutre) entre les différentes surfaces composant la lampe. Ce bilan est détaillé dans [3], Compte tenu des nombreux paramètres présents dans le bilan et de l'aspect non linéaire de celui-ci (présence de termes radiatifs), les valeurs des températures du filament et du quartz sont obtenues de façon itérative.

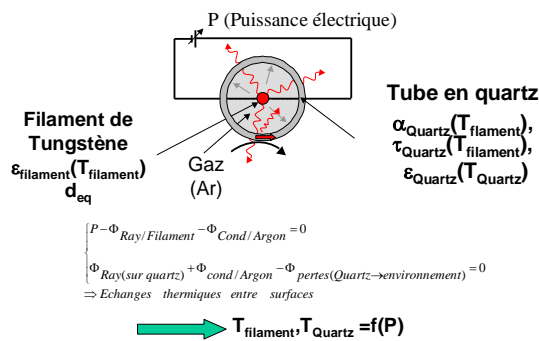


Figure 4

P désigne la puissance électrique, ϵ , τ , α , respectivement l'émissivité, la transmission et l'absorptivité d'un matériau, Φ un flux. Nous présentons sur les figures 5 et 6, les principaux résultats de ces calculs et les confrontations aux mesures :

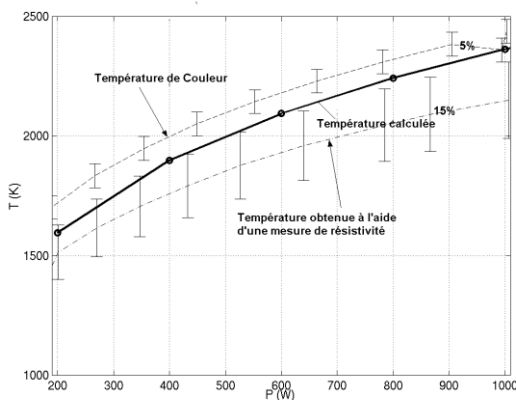


Figure 5

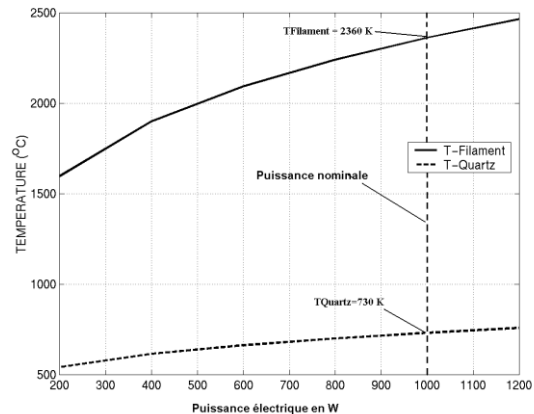


Figure 6

Nous voyons, d'après le mode de calcul employé dans le modèle, que la température atteinte par le filament pour la puissance nominale est de 2360K, le bilan thermique au niveau du tube permet alors de déterminer une température de quartz égale à 730K. Dans ces conditions, une mesure de température de surface sur le quartz permet de donner des informations importantes sur la fiabilité du modèle proposé puisque la température de quartz est calculée à partir de celle du filament. Nous avons pu obtenir un spectre de quartz en contactant la société Philips Eclairage qui fabrique les lampes (spectres obtenus à partir d'échantillons plats de 1 mm d'épaisseur pour la réflectivité et pour des demi tubes de 1.25 mm d'épaisseur pour l'émission), ce spectre est présenté sur la figure 7, il conduit à une émissivité intégrée sur la bande 8-12 μm égale à 0.85, une réflectivité de 0.15 (la transmission étant nulle) :

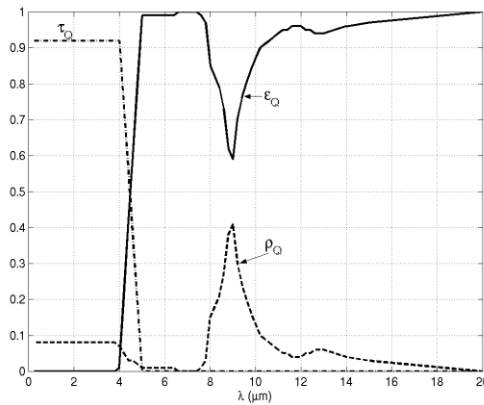


Figure 7

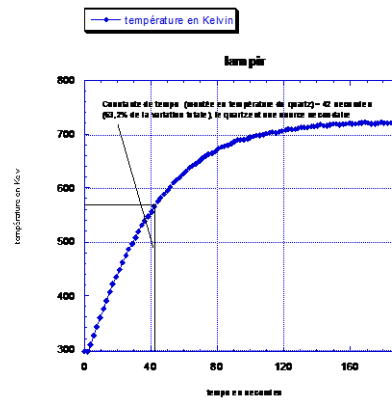


Figure 8

La mesure de température du quartz est donc possible à l'aide de la caméra IR car celui est opaque dans la gamme 8-12 μm . On a choisi une zone de surveillance sur le tube directement à l'aide des thermogrammes en considérant la partie homogène de la surface du tube et les effets de courbures. Cette zone de surveillance correspond à un rectangle allongé couvrant 30 % de la surface totale du quartz. Le tracé de cette zone de surveillance au cours du temps est donné sur la figure 8 : il correspond à un cycle de démarrage du tube jusqu'au régime permanent. Ce suivi temporel de la température permet de déterminer, en assimilant le tube à un système thermique du premier ordre, une constante de temps τ égale à # 42 secondes, à 95 % de la réponse finale (3τ), le temps est de 2 minutes. Pour un cycle complet de fonctionnement allumage/extinction tel que l'on pourrait en trouver dans un chauffage de type pulsé, la période serait de 4 minutes ce qui n'est pas négligeable (cette « inertie » étant bien sur faible par rapport à d'autres sources infrarouges notamment les IR moyens utilisés en thermoformage). Au delà de 5τ (plus de 99% de la réponse finale), on peut considérer que le système a atteint son régime permanent. Dans ces conditions, on trouve sur la zone surveillée une température moyenne de 448 °C , une température maximale de 462 °C, une température minimale de 417 °C et un écart type de 7.5 °C, le coefficient de réflexion mesuré ayant une incidence négligeable sur les niveaux de température atteints par la surface du tube (milieu ambiant froid par rapport au tube); nous constatons que l'écart relatif de la température moyenne calculée par le modèle par rapport à la température mesurée par thermographie IR est de 1.2%, ce qui permet de valider en première approche le modèle implanté dans le code de calcul pour la température de source IR (l'incertitude étant prise en compte à terme dans un calcul de sensibilité).

Validité des mesures de température de surface sur le P.E.T .

Celui ci se comporte comme un matériau **semi-transparent** dont il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-optiques. La transmission et la réflectivité du P.E.T ont donc été étudiées. Le but de ces mesures est de caractériser les phénomènes d'absorption et aussi de caractériser l'émission propre des préformes. Afin de réaliser cette étude nous avons utilisé des plaques en PET de 2,3 et 4 mm d'épaisseur, réalisées par injection dans les mêmes conditions que les préformes. Des échantillons de plus faibles épaisseurs ont été réalisés à partir de ces plaques par polissage jusqu'à 0.9 mm et par découpes au microtome jusqu'à 20 μm . La transmission et la réflectivité spéculaire ont été mesurées au moyen d'un spectromètre (F.T.I.R.). L'ensemble des mesures a été exploité à partir de l'expression de la loi de Beer-Lambert couramment utilisée [4] pour modéliser les transferts au sein des polymères où T_λ représente un facteur de transmission apparent mesuré par le spectromètre, τ_λ : la transmission réelle, ρ_λ la réflectivité, A_λ un coefficient intrinsèque d'absorption, d : une épaisseur et C une constante dans les calculs:

$$-\ln T_\lambda = -\ln \tau_\lambda + \ln \frac{1+\rho_\lambda}{1-\rho_\lambda} = A_\lambda d + C_\lambda$$

L'identification du coefficient intrinsèque d'absorption du PET au moyen de cette expression, permet de définir le type de comportement spectral. Finalement, nous traçons le coefficient

d'absorption du P.E.T en m^{-1} et la distribution de l'émittance spectrale des lampes obtenue à partir de la loi de Planck et des températures calculées du quartz et du filament (figure 9) :

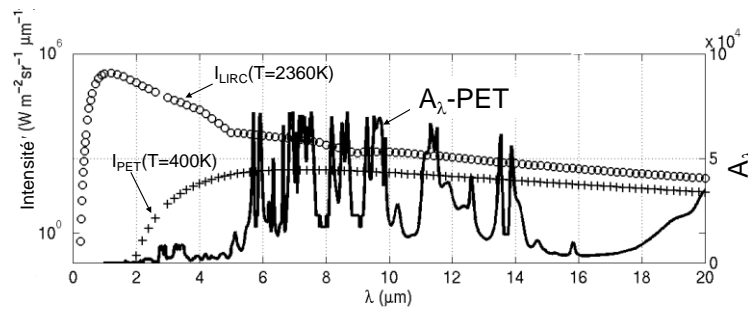


Figure 9

Ces mesures permettent de caractériser l'interaction entre les lampes halogènes et le PET. Le calcul du coefficient d'absorption moyen en fonction de la température de la source ainsi que l'épaisseur optique permettent de quantifier cette interaction (Table 1) :

Caractéristique de la source	Distribution spectrale (μm) de l'énergie	A (m^{-1})	E(mm)
Absorption / filament de tungstène	T=2360K- [1-2.5]-IR-C (60%)	90	3.2
Emission / préforme en PET	T _{max} =400K [5-20]-IR-L (79 %)	30000	30 10^{-3}

Table 1 : Quantification de l'interaction lampes halogènes et préformes en PET

Ces mesures mettent en évidence le fait que le PET est très transparent aux courtes longueurs (coefficient d'absorption faible), ce qui correspond au rayonnement émis par le filament des lampes halogènes : ce rayonnement est donc très pénétrant et chauffe à « cœur » le matériau ; « l'épaisseur optique » $E=1/A$ est comparable à l'épaisseur de la préforme, c'est à dire 3 mm (l'épaisseur optique désigne la « profondeur » vue par la caméra dans le matériau); ce qui ne serait pas le cas dans un chauffage convectif ou en IR moyen où le chauffage serait surtout localisé sur la surface. L'émission propre, à la température des préformes soit # 400K, est principalement surfacique comme le montre le coefficient d'absorption A très élevé dans cette gamme de longueur d'onde : l'épaisseur optique résultante entre 8 et 12 μm est de $30 \cdot 10^{-3}$ mm. Ces mesures complétées avec des mesures de cristallinité réalisées par analyse enthalpique différentielle A.E.D, identifiant un PET amorphe permettent de conclure que les phénomènes de transfert radiatif sont uniquement des phénomènes d'absorption sans diffusion, décrits par l'équation de transfert radiatif, réduite à son expression la plus simple :

$$\frac{\partial L_{\lambda}(M, \vec{s})}{\partial \vec{s}} = -A_{\lambda} L_{\lambda}(M, \vec{s})$$

D'après ce qui précède et sur la bande [8-12] μm ; les mesures de transmission et de réflectivité ont permis d'identifier une émissivité égale à 0.93, que l'on a intégrée dans le logiciel d'analyse de la caméra afin de mesurer la température vraie à la surface des préformes en P.E.T. On s'affranchit également de la réflectivité dont la valeur est égale, dans ce cas, à 0.07 (7%) en effectuant une différence d'image entre le moment où la préforme froide entre dans le four (image de référence initiale) et les images suivantes du fichier de mesures. Le terme de réflectivité apporte une variation de 3°C sur les niveaux de température réels atteints par la préforme. Dans ces conditions, nous avons pu faire un certain nombre de mesures de température sur des préformes en fin de cycle de chauffage (environ 30 secondes), à l'aide de la thermographie IR, afin de mesurer la distribution de température en face externe et interne par une méthode originale de découpe et reconstitution de la préforme à l'aide de graisse thermique. Ce procédé et quelques résultats sont donnés en figure 10 (tracés) et 11 (découpes):

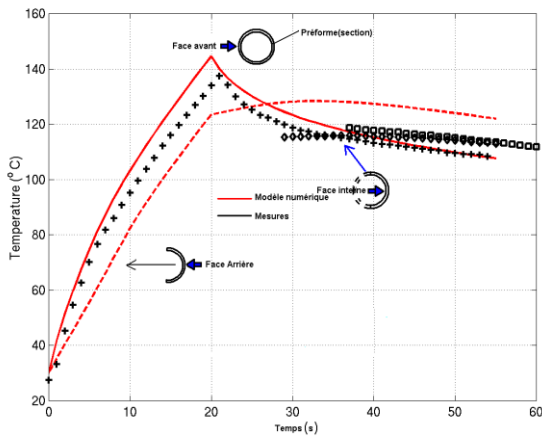


Figure 10

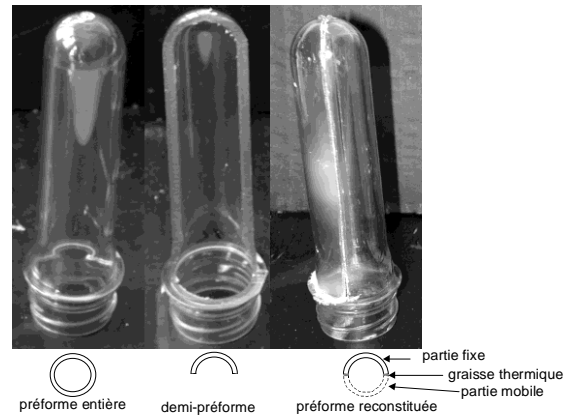


Figure 11

3) Mesure du coefficient d'échange convectif selon la hauteur de la préforme.

Dans ce paragraphe, nous proposons une mesure du coefficient d'échange convectif en régime forcé, généré par le ventilateur selon la hauteur de la préforme ($H=100\text{mm}$), deux méthodes ont été développées. La première consiste à mesurer la vitesse et la température de l'air le long de la préforme à l'aide d'un anémomètre à fil chaud de type Ans Snelco et de thermocouples; Les données obtenues ont permis de calculer le nombre de Reynolds de l'écoulement qui se situe dans la gamme 4000-10000, ce qui correspond à un écoulement turbulent. En identifiant différentes corrélations dans la littérature [4] pour un cylindre placé dans un jet d'air, Il a été possible de déterminer la valeur du coefficient d'échange à partir de la relation classique $Nu = hL/k = f(Re, Pr)$ où h est le coefficient d'échange convectif en $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, L une dimension caractéristique de la préforme et k le coefficient de conductivité thermique du fluide en $\text{W/m}\cdot\text{K}$, Re le nombre de Reynolds et Pr le nombre de Prandtl. La deuxième méthode est basée sur la thermographie IR, La mesure des températures de surface de la préforme est faite selon la hauteur en tenant compte de ce qui a été dit dans la partie 2 et en ajoutant la ventilation afin de refroidir la surface du matériau. La procédure de mesure est la alors la suivante : 20 secondes de chauffage avec ventilation; puis arrêt du chauffage et de la ventilation, afin d'obtenir une température uniforme dans l'épaisseur de la préforme, la durée de cette phase est déterminée par simulation à l'aide de Plastirad; Enfin on redémarre la ventilation. Il est alors possible durant cette dernière phase de résoudre simplement l'équation de bilan thermique en assimilant la préforme à un tube et en faisant quelques hypothèses : L'équation de refroidissement la plus simple relatif à la préforme s'écrit :

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = -hS(T - T_\infty)$$

avec ρ : masse volumique du P.E.T, C_p sa capacité calorifique, h le coefficient d'échange cherché, T_∞ , la température à « l'infini » (zone non perturbée par les phénomènes convectifs), dans notre cas, il s'agit de la température d'environnement du four ou « T_{env} ». Cependant l'équation précédente, dite en « température moyenne », n'est pas applicable dans un milieu comme le P.E.T où la conductivité thermique est faible et où les inhomogénéités en température peuvent être grandes. En reprenant l'équation précédente au voisinage de l'origine de la phase de ventilation, on arrive à :

$$h = \frac{-\rho V C_p \left(\frac{d\bar{T}}{dt}\right)_{t=0}}{S(T_0 - T_\infty)}$$

où T_0 représente la température en début de refroidissement et \bar{T} une température moyenne. Pour faire ce calcul simple, il faut rechercher un temps (une épaisseur) caractéristique où les phénomènes de conduction apparaissent (rupture de pente sur la courbe de refroidissement). On fait

appel pour cela à la notion de profondeur de diffusion thermique $e = \sqrt{at_c}$, où a est la diffusivité thermique $k/\rho C_p$ du P.E.T soit $1.17 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et t_c un temps caractéristique. Pour un t_c de 4 s et une profondeur e de 0.7 mm, nous avons:

$$h = \frac{-\sqrt{\rho k C_p t_c} \cdot \left(\frac{dT}{dt}\right)_{t=0}}{(T_0 - T_\infty)}$$

qui est calculée à différentes hauteurs de la préforme d'après la carte de températures corrigées fournie par la caméra IR, on obtient ainsi le graphe suivant (figure 12) :

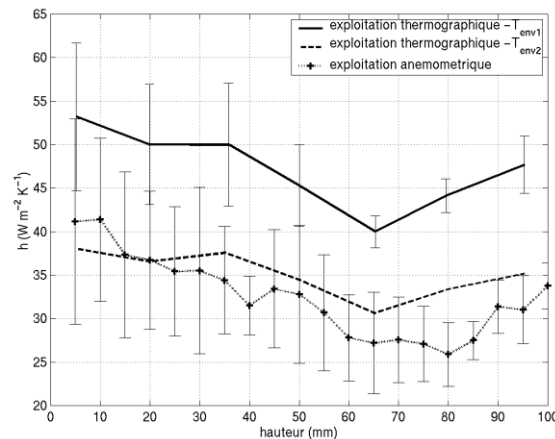


figure 12 : Tracé du coefficient d'échange convectif pour deux températures d'environnement Four Tenv et comparaison au calcul obtenu d'après les mesures de vitesse et les températures d'air autour de la préforme.

Nous voyons que la thermographie donne des résultats en bonne accord avec la méthode « classique » et elle présente l'avantage de fournir rapidement l'évolution de h selon la hauteur. Nous avons déterminé la valeur effective de h et nous avons obtenu : $45 \pm 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; des mesures similaires ont été effectuées sur différents fours industriels et la plage de h ainsi obtenue se trouve dans la gamme $[35-60] \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en bon accord avec nos valeurs de laboratoire.

Conclusion : Tout au long de cet article, nous avons proposé trois illustrations de la thermographie quantitative, de la plus simple à la plus compliquée. Ces trois volets illustrent bien les potentialités et la souplesse de la thermographie infrarouge face à une situation radiométrique bien contrôlée. Tous les résultats présentés ont été intégrés comme paramètres d'entrée dans un outil de modélisation numérique [3] permettant de simuler de façon satisfaisante l'étape de chauffage des préformes en PET : l'erreur relative entre les données de mesures et les résultats de simulation reste inférieure à 10 %. Ce logiciel de simulation est aujourd'hui en cours de test au sein de la société Vittel-Perrier.

Bibliographie

- [1] Denis G. « Extrusion-soufflage et injection-soufflage avec ou sans bi-étirage », Techniques de l'ingénieur, Am4, A3700, 1989.
- [2] Pajani D. « Mesure par thermographie infrarouge », ADD éditeur, 1989.
- [3] Monteix S. « Modélisation du chauffage convecto-radiatif de préformes en P.E.T pour la réalisation de corps creux », Thèse de doctorat de l'E.N.S.M.P, 2001.
- [4] F.P. Incropera, D.P De Witt, « Fundamentals of Heat and Mass Transfer », éditions Wiley, 1990.

