

Prédiction de la distribution d'épaisseur d'une pièce thermoformée avec bullage d'un multicouche en ABS/PMMA

Caroline JOBEY*, Nadine ALLANIC, Pierre MOUSSEAU, Rémi DETERRE, Christophe PLOT, David LETOURNEUR

Université - IUT de Nantes, CNRS, GEPEA, UMR 6144, IUT de Nantes, 2 avenue du Professeur Jean Rouxel, 44475 Carquefou Cedex

*(Auteur correspondant : caroline.jobey@univ-nantes.fr)

Résumé- En thermoformage, l'une des principales difficultés est d'éviter la présence de faible épaisseur dans les zones les plus déformées. Après la phase de chauffage, une étape de bullage est réalisée pour homogénéiser l'épaisseur de la plaque avant formage (utilisée principalement pour le thermoformage de grandes pièces). Dans ce travail, nous évaluons comment la déformation initiale de la bulle influence l'épaisseur finale du produit. Des essais expérimentaux sont effectués à partir d'une feuille multicouche d'ABS/PMMA. Un moule industriel, correspondant à un élément de carter d'une voiture sans permis, a été adapté sur une thermoformeuse de laboratoire. Après avoir présenté les profils thermiques expérimentaux des feuilles multicouches mesurées au cours de la phase de chauffage, un premier modèle géométrique est étudié afin de prédire la répartition d'épaisseur de la pièce thermoformée. Les résultats numériques sont comparés aux mesures expérimentales.

Nomenclature

e	épaisseur de la pièce, mm	<i>Symboles grecs</i>	
E_{pc}	épaisseur critique, mm	Φ	éclairage infrarouge, kW/m^2
G'	module d'élasticité, MPa	<i>Indices et exposants</i>	
G''	module de perte, MPa	b	bulle
T	température, $^{\circ}C$	min	minimale
T_g	température de transition vitreuse, $^{\circ}C$	max	maximale
S	surface, m^2	p	plaque
$\tan \delta$	facteur d'amortissement, <i>sans unité</i>		

1. Introduction

Le thermoformage est un procédé de mise en œuvre employé pour la production de pièces polymères à parois fines avec une géométrie relativement simple. Du fait des faibles coûts d'outillage et des temps de développement courts, l'extension des procédés de thermoformage traditionnels aux grandes pièces techniques est en plein essor dans de nombreux secteurs industriels (nautisme, sanitaire, automobile,...) [1]. Cette extension nécessite d'adapter le thermoformage aux feuilles épaisses (>2 mm) pour produire des pièces aux géométries complexes impliquant des taux de déformations élevés [2, 3]. Une des principales difficultés repose sur le contrôle de la distribution d'épaisseur finale [4]. De ce fait, l'introduction d'une étape de bullage, permettant un pré-étirement du matériau, est un moyen classique, pour améliorer les résultats dans les procédés industriels. La température initiale de la feuille influence la hauteur de la bulle et donc la distribution d'épaisseur finale de la pièce [5].

Dans cette étude, des considérations géométriques sont formulées afin d'exprimer la relation entre la distribution d'épaisseur de la bulle et la distribution d'épaisseur de la pièce finale. Les prédictions du modèle sont confrontées aux résultats expérimentaux obtenus à l'aide du moule industriel et de la thermoformeuse pilote. Les mesures thermiques réalisées durant la phase de chauffage, sont exploitées pour mieux appréhender le comportement du

matériau durant les différentes phases du procédé et analyser la répartition d'épaisseur de la pièce.

2. Matériaux et méthodes

Le domaine d'application concerné dans cette étude est la fabrication de voitures sans permis. Pour des raisons de productivité, de nombreuses pièces de carrosseries, aux géométries complexes, sont thermoformées simultanément, avec un moule positif. Les feuilles multicouches d'ABS/PMMA obtenues par coextrusion présentent des qualités spécifiques propres à chacun des matériaux: la haute résistance mécanique de l'ABS est ainsi associée aux qualités de brillance et de résistance aux UV du PMMA. Ainsi, selon la géométrie des moules et de leur taux de déformation, l'épaisseur initiale de la feuille peut varier de 2,5 à 3 mm. Pour éviter un vieillissement accéléré du produit thermoformé (stress cracking [6]), une épaisseur minimale de 1,1 mm est requise.

2.1. Caractérisation des propriétés des feuilles multicouches d'ABS/PMMA

Une observation microscopique d'une feuille de 2,5 mm est illustrée en Figure 1 a. La figure montre qu'elle est constituée de deux couches de PMMA correspondant à une couche transparente de PMMA (205 μm) et une couche colorée de PMMA (370 μm). Le reste de la feuille est constituée de trois couches d'ABS, correspondant respectivement à une couche colorée d'ABS (656 μm), à une couche support d'ABS recyclé (902 μm) et d'un ABS vierge (370 μm). En première approximation, le matériau est considéré homogène. Sa température de transition vitreuse $T_g = 109^\circ\text{C}$ a été déduite par une analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC). Une analyse thermomécanique dynamique (DMTA) dans la région viscoélastique linéaire en mode traction a été réalisée. Les échantillons sont rectangulaires de dimensions 60 x 12 x 2,5 mm. Les essais sont faits à une fréquence de sollicitation de 1Hz à déformation imposée de 0,35% (Figure 1 b). Les échantillons étudiés ont été prélevés à la fois dans le sens parallèle et dans le sens perpendiculaire à l'extrusion. Il n'a été observé aucun effet anisotrope dans ces expériences. La figure 1 b montre une diminution importante du module élastique après la transition vitreuse, de 19MPa (123° C) à 0,28MPa (189° C). On observe que le plateau caoutchoutique est relativement grand, ce qui peut s'expliquer par la morphologie des polymères amorphes qui leur confèrent de hautes masses moléculaires [7]. Avec les thermoplastiques, une modulation de la cartographie thermique d'une plaque à thermoformer est envisageable afin d'optimiser la distribution d'épaisseur d'une pièce en fonction de ses taux d'étirements, contrairement aux polymères vitreux.

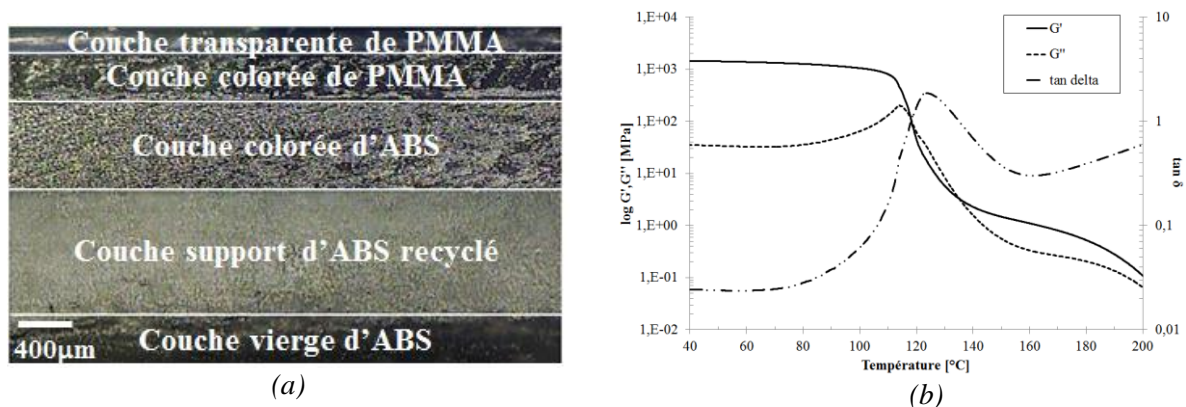


Figure 1: Feuille multicouche d'ABS/PMMA

(a) Composition observée avec un microscope optique (b) Propriétés mécaniques

2.2. Le procédé de thermoformage

Des essais expérimentaux sont effectués dans des conditions de laboratoire représentatives des différentes phases du procédé industriel (chauffage, bullage, formage, refroidissement). Pour ce faire, une thermoformeuse FORMECH 508FS, schématisée en Figure 2, est utilisée. Cette machine est équipée d'un système de bullage, d'une pompe à vide pour la phase de formage, et d'un ventilateur pour l'étape de refroidissement. La taille maximale de la feuille est de 500 x 450 mm², correspondant à une zone de formage de 480 x 430 mm². Le chauffage radiatif, représenté sur la Figure 3a, est positionné au-dessus de la feuille thermoplastique. Il est constitué de 15 émetteurs quartz infrarouges, divisés en quatre zones régulées indépendamment.

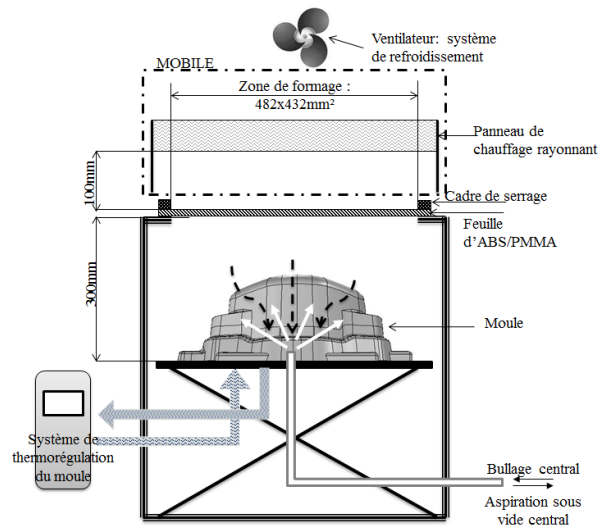


Figure 2 : Vue globale de la thermoformeuse

Les rayonnements infrarouges maximaux dépendent de leur zone et varient de 9,8 à 19,4 kW.m⁻² (Figure 3a). Le moule peut être régulé par une circulation d'eau ou d'huile associée à un système de thermorégulation. Durant le procédé, la plaque est premièrement chauffée jusqu'à sa température de ramollissement, ensuite elle est bullée pour être préalablement déformée (meilleure répartition épaisseur). Le formage du matériau est réalisé à partir de la montée du moule et ensuite par une aspiration sous vide (Figure 2). Au final, la pièce est refroidie par conduction avec le moule et par convection forcée.

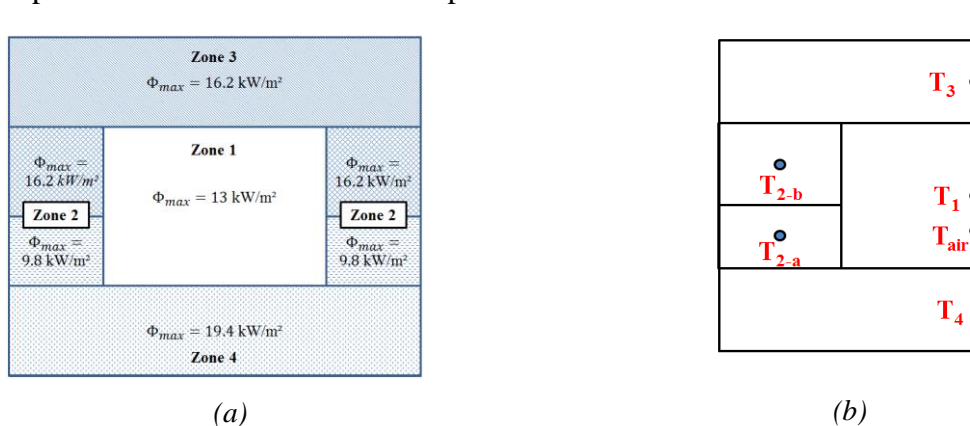


Figure 3 : Configuration thermique expérimentale
(a) chauffage infrarouge (b) position des thermocouples

Les essais de thermoformage sont menés avec des feuilles d'ABS/PMMA noires ayant une épaisseur de $2,9 \pm 0,1$ mm. Chaque face de la feuille est équipée de dix thermocouples de type K dont la position est donnée en Figure 3b. La température de l'air est mesurée à partir d'un thermocouple situé à mi-chemin entre la plaque et le banc de chauffage supérieur. Un autre est placé à la surface inférieure de la feuille pour mesurer la température de l'air dans le bâti.

Le thermoformage est réalisé avec un moule industriel, en fonte d'aluminium d'une pièce de carter, représenté en Figure 4. Il n'est pas axisymétrique et ses variations géométriques comportent une large gamme de taux de déformations.

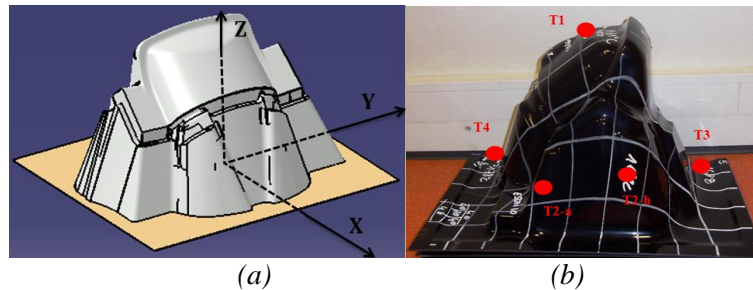


Figure 4 : a) Vue 3D du moule carter et b) pièce thermoformée avec positions des thermocouples

2.3. Prédiction géométrique de la répartition d'épaisseur

La méthode consiste à modéliser la distribution d'épaisseur de la pièce thermoformée par une approche géométrique. Une conservation de volume est supposée, correspondant à un coefficient de Poisson ν , d'environ 0,5 lequel est cohérent pour les matériaux caoutchoutiques. Dans la première étape, l'épaisseur de la bulle est déterminée par une projection de la surface de la feuille (S_p) sur la surface de la bulle (S_b). La géométrie de la bulle est définie à partir de l'équation d'une calotte sphérique de rayon de courbure R_c . Cette géométrie analytique est validée avec des mesures expérimentales. Le centre de la calotte sphérique est utilisé pour déterminer les angles solides successifs ($\alpha_1, \alpha_2, \dots$). Pour chacun des angles solides, nous réalisons une projection des sections de la calotte sphérique correspondant aux sections de la bulle et de la feuille. La projection de chacune des surfaces (S_p/S_b) détermine le taux de déformation local, ainsi, en le multipliant par l'épaisseur initiale de la plaque (e_0), on définit l'épaisseur locale moyenne de la bulle (e_b) en fonction de la zone angulaire correspondante. Afin de calculer l'épaisseur de la pièce, nous projetons la surface de la calotte sphérique sur la surface du moule, en fonction des angles solides. En multipliant ces rapports de surface par l'épaisseur de la bulle, on définit l'épaisseur locale moyenne de la pièce thermoformée.

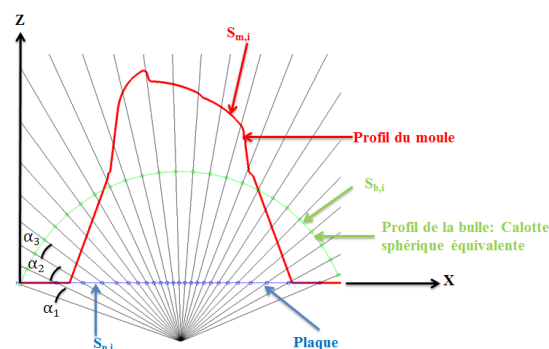


Figure 5 : Distribution d'épaisseur d'une plaque bullée et thermoformée

3. Résultats expérimentaux

3.1. Conditions expérimentales

Quatre configurations thermiques du banc de chauffage (Tableau 1) ont été testées. Lors des essais, le flux thermique des émetteurs n'excède pas 8 kW/m² pour éviter de créer de forts gradients thermiques dans la plaque thermoplastique. Le moule est régulé à 75°C (même condition que dans le procédé industriel). Avant thermoformage de la pièce, la feuille est quadrillée (carreau de 50 x50 mm²) afin d'observer les taux d'étirement comme montré en Figure 4b.

N° ESSAI	$\Phi_{\text{émis}}$ [kW/m ²]				
	Zone 1	Zone 2-a	Zone 2-b	Zone 3	Zone 4
1	4	3,9	6,5	4,9	5,8
2	2,6	3,9	6,5	4,9	5,8
3	1,3	3,9	6,5	6,5	7,8
4	2,6	3,9	6,5	6,5	7,8

Tableau 1 : Configurations du flux radiatif émis par zone

3.2. Etude thermique de la plaque

Les températures, côté PMMA, obtenues à la fin de l'étape de chauffage (d'une durée de 350s) sont données dans le Tableau 2. Les températures varient de 153 à 177°C selon la zone et l'essai. Localement sur une zone, les variations de températures mesurées entre les différents essais ne dépassent pas 15°C. L'écart-type sur la face supérieure varie de 4,7°C (essai 4) à 8,5°C (essai 3). L'écart de température (ΔT_i) entre la face supérieure (PMMA) et inférieure (ABS), pour chaque essai est aussi précisé.

N°	Zone 1 [°C]		Zone 2 [°C]		Zone 2 [°C]		Zone 3 [°C]		Zone 4		Tair [°C]	
	T1	$\Delta T1$	T2-a	$\Delta T2-a$	T2-a	$\Delta T2-a$	T3	$\Delta T3$	T4	$\Delta T4$	Tair	$\Delta Tair$
1	168,2	21,4	160,9	24,4	164,5	22,5	153,1	22,5	167,0	40,3	104,0	35,8
2	163,0	22,5	172,3	31,8	171,9	23,1	157,3	23,1	165,7	28,2	110,6	8,5
3	153,6	23,8	169,8	25,9	167,7	25,5	164,5	25,5	176,9	33,8	111,4	7,4
4	168,2	21,4	172,3	30,1	171,9	18,7	164,5	18,7	176,9	30,6	121,2	4,6

Tableau 2 : Températures en fin de chauffage sur la couche supérieure (PMMA) de la feuille et gradient de température entre la surface supérieure (PMMA) et inférieure (ABS) des essais 1 à 4

La Figure 6 présente les profils thermiques de l'essai 3 au cours du procédé de thermoformage après la phase de chauffage. Les temps de bullage et de montée du moule sont très rapides (2s). On voit distinctement l'impact d'arrivée d'air comprimé sur la feuille et la prise de contact entre la matière et le moule, entraînant rapidement son refroidissement. D'après la figure 4b, les points de contacts obtenus thermiquement, sont cohérents avec la géométrie du moule. Les profils thermiques des essais 1,2 et 4 exposent le même classement des points de contact.

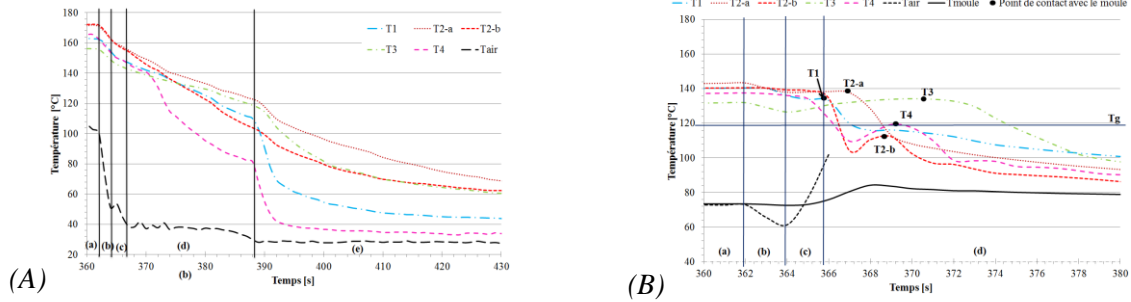


Figure 6 : Profils de température de la plaque de l'étape de bullage jusqu'au formage côté PMMA (essai 3) (A) et côté ABS (B) : (a) Chauffage, (b) Bullage, (c) Montée du moule, (d) Formage et (e) Refroidissement

La Figure 1b montre que le module élastique de l'ABS/PMMA diminue grandement avec la température. Ainsi, durant les étapes de bullage et formage, la déformation de l'ABS/PMMA est hétérogène. La présence de haut gradient thermique favorise l'apparition de hautes contraintes internes dans le matériau et fixe la conformation de la bulle [8].

3.3. Répartition des épaisseurs

La Figure 7 montre la distribution d'épaisseur de la pièce mesurée expérimentalement pour les quatre essais, ainsi que le profil du moule dans le plan (XZ). Les épaisseurs ont été mesurées en utilisant un micromètre à afficheur digital (précision de $\pm 2\mu m$). Les résultats présentent une incertitude sur X de $\mp 10mm$. Comme le montre la Figure 7, la zone 1 est la plus sensible aux taux de déformations, impactant la distribution d'épaisseur.

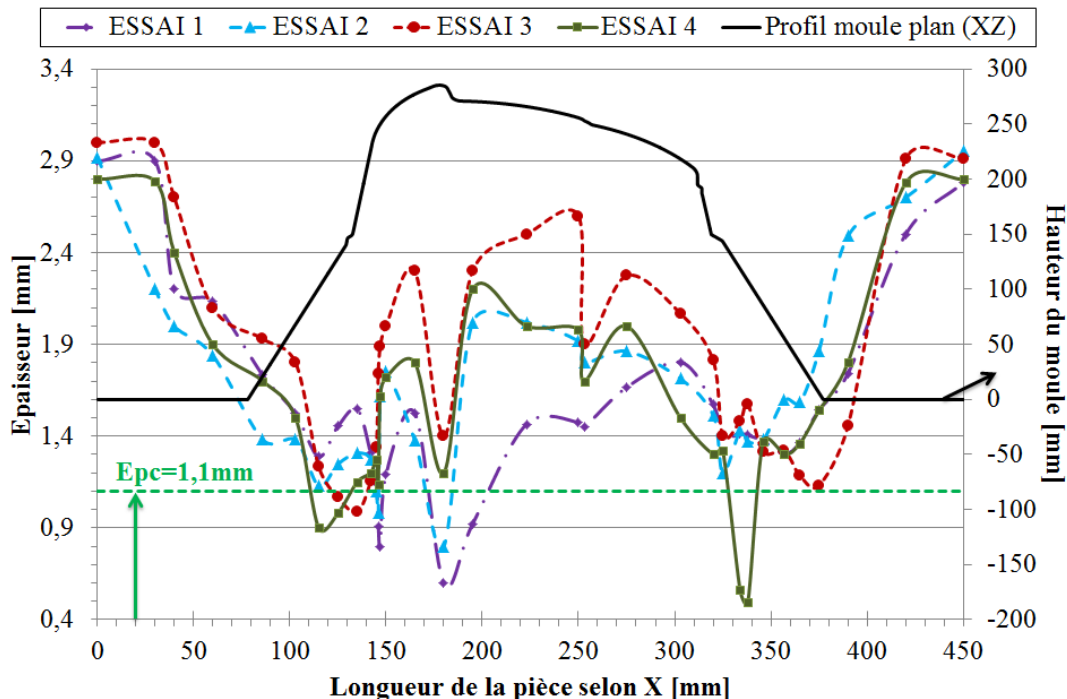


Figure 7 : Distribution de l'épaisseur du carter thermoformé pour les quatre différentes configurations thermique dans le plan (XZ)

Dans cette zone, les épaisseurs les plus élevées (Tableau 3) correspondent à l'essai 3, où l'éclairage infrarouge est le plus faible. Lors des essais 2 et 4, la feuille reçoit en zone

centrale un rayonnement infrarouge correspondant à 20% de la puissance électrique de la zone 1. L'essai 1 affiche des épaisseurs bien inférieures aux autres, car l'éclairage infrarouge est le plus élevé (40% du flux total) sur l'ensemble des zones. Ainsi, la modulation thermique des émetteurs en fonction de la géométrie du moule s'avère nécessaire pour obtenir une distribution d'épaisseur optimale.

		Epaisseur pièce [mm]			
		ESSAI 1	ESSAI 2	ESSAI 3	ESSAI 4
Zone 3	e_{\min} [mm]	1,24	0,91	0,99	0,91
	e_{\max} [mm]	2,90	2,92	3,00	2,80
Zone 1	e_{\min} [mm]	0,60	0,80	2,21	2,00
	e_{\max} [mm]	1,80	2,02	2,60	1,20
Zone 4	e_{\min} [mm]	1,54	1,20	1,13	0,49
	e_{\max} [mm]	2,80	2,95	2,91	2,80

Tableau 3 : Epaisseur minimales et maximales de la pièce

3.4. Prédiction géométrique

Les figures 8a et 8b montrent la comparaison de la distribution d'épaisseur de la pièce entre les données expérimentales et les résultats prédits sur une considération purement géométrique (Figure 5). La Figure 8a montre aussi la distribution d'épaisseur de la bulle considérée. Le taux de déformation est plus grand au sommet de la bulle et le profil d'épaisseur est cohérent avec la littérature [9,10]. En considérant une épaisseur initiale de bulle constante (Figure 8b), l'écart entre les résultats expérimentaux et numériques pour la distribution d'épaisseur de la pièce, est irrégulier et non négligeable. A présent, en prenant en compte, le pré-étirement de la bulle, les résultats théoriques du profil d'épaisseur de la pièce, sont plus proches de ceux expérimentaux. Les écarts observés entre la théorie et l'expérimental varient d'un essai à l'autre, car le comportement thermomécanique de la matière n'est pas considéré.

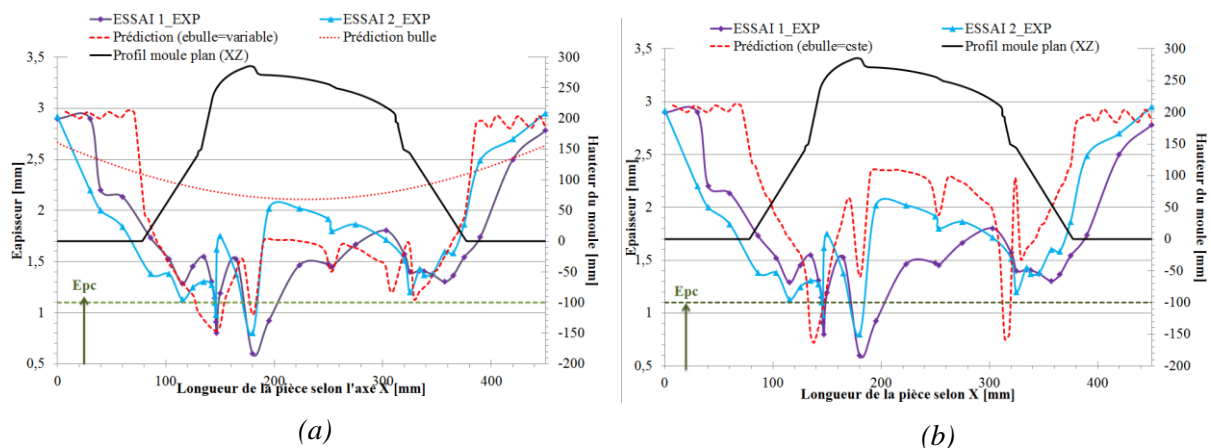


Figure 8 : Distribution des épaisseurs de la pièce thermoformées selon l'axe X : (a) épaisseur de la bulle variable et (b) : épaisseur de la bulle constante

Toutefois la confrontation montre que la modélisation de l'étape de bullage est essentielle pour prédire l'épaisseur du produit fini. Une étude complémentaire a été réalisée sur un autre moule comportant des rapports d'étirement équivalents. Des résultats similaires ont été obtenus.

4. Conclusion

L'influence de la phase de bullage dans le procédé de thermoformage a été étudiée. L'étude expérimentale a été réalisée sur une feuille multicouche d'ABS/PMMA. La distribution d'épaisseur a été prédite, en prenant en compte les rapports de surfaces. Le bon accord du modèle avec les résultats expérimentaux a été obtenu avec une géométrie de moule non triviale. Les mesures expérimentales montrent clairement que la modulation de la cartographie thermique de la plaque est très importante sur la distribution d'épaisseur finale de la pièce. De même, la forme de la bulle, le temps de bullage, conditionnent la cinétique de refroidissement de la matière lors de l'étape de formage impactant la distribution d'épaisseur de la pièce. Dans les futures étapes du projet, le comportement hyper-élastique du matériau sera intégré au modèle afin de prédire la distribution d'épaisseur de la pièce selon la configuration thermique de la plaque et la forme de la bulle. Un moule pilote axisymétrique thermorégulé servira de base pour ces essais expérimentaux et numériques. Le dispositif de thermoformage comportera deux bancs de chauffage pour exclure les problèmes de gradient thermique de la feuille thermoplastique.

Références

- [1] Ashter, Syed Ali. « 1 - Introduction to Thermoforming ». In *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates*, édité par Syed Ali Ashter, 1-12. Oxford: William Andrew Publishing, 2014.
- [2] aus der Wiesche, Stefan. « Industrial Thermoforming Simulation of Automotive Fuel Tanks ». *Applied Thermal Engineering* 24, n° 16 (novembre 2004): 2391-2409. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.03.003.
- [3] H. Metwally, and P.Ding, "Implementing simulation driven product development for thermoforming of an instrument panel", ANSYS, 2012.
- [4] Erdogan, Ertugrul Selcuk, et Olcay Eksi. « Prediction of Wall Thickness Distribution in Simple Thermoforming Moulds ». *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 60, n° 3 (15 mars 2014): 195-202. doi:10.5545/sv-jme.2013.1486.
- [5] Wang, H. T., B. R. Pan, Q. G. Du, et Y. Q. Li. « The strain in the test environmental stress cracking of plastics ». *Polymer testing* 22, no 2 (2003): 125-28.
- [6] Lee, Je Kyun, Terry L. Virkler, et Chris E. Scott. « Influence of initial sheet temperature on ABS thermoforming ». *Polymer Engineering & Science* 41, n° 10 (2001): 1830-44.
- [7] Billon, N. « Constitutive Model for HIPS in the Thermoforming Range ». *International Journal of Material Forming* 1, n° S1 (avril 2008): 679-82. doi:10.1007/s12289-008-0306-7.
- [8] Nam, Gi Joon, Jae Wook Lee, et Kyung Hyun Ahn. « Three-dimensional simulation of thermoforming process and its comparison with experiments ». *Polymer Engineering & Science* 40, n° 10 (2000): 2232-40.
- [9] Dong, Y., R. J. T. Lin, et D. Bhattacharyya. « Determination of critical material parameters for numerical simulation of acrylic sheet forming ». *Journal of materials science* 40, n° 2 (2005): 399-410.
- [10] Rachik, M., F. Schmidt, N. Reuge, Y. Le Maoult, et F. Abbeé. « Elastomer biaxial characterization using bubble inflation technique. II: Numerical investigation of some constitutive models ». *Polymer Engineering & Science* 41, n° 3 (2001): 532-41.