

Maitrise de la régulation thermique d'un outillage utilisé dans la mise en forme des matériaux polymères

Nasser FEKIRI*, Cécile CANTO, Pierre MOUSSEAU, Alain SARDA

LUNAM Université, Université de Nantes, CNRS, Laboratoire GEPEA, UMR 6144, IUT de Nantes, France.

(* auteur correspondant : IUT de Nantes, 2 avenue du Professeur Jean Rouxel, 44475 CARQUEFOU Cedex, Nasser.Fekiri@univ-nantes.fr)

Résumé - Dans ce papier, on présente un outillage complexe composé d'une part d'un moule multi-empreinte conçu en réduisant la masse chauffée et équipé de zones de régulation indépendantes placées au plus près de chaque cavité moulante et d'autre part, d'un bloc à canaux régulés (BCR) qui permet de limiter les déchets de caoutchouc lors de l'injection. L'originalité de cet outillage consiste à isoler thermiquement le BCR du moule et les empreintes entre elles afin de mieux contrôler le champ de température dans la matière qui se transforme. Nous présentons la conception et l'instrumentation du montage expérimental. Une étude numérique 3D nous a permis de simuler les transferts de chaleur dans l'outillage (moule et BCR) et de montrer les hétérogénéités thermiques et les différences de cinétiques de vulcanisation dans chaque pièce moulée

Nomenclature

ρ	Masse volumique (kg.m^{-3})	k	Fonction cinétique (s^{-1})
λ	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	E	Energie d'activation (J/mol)
C_p	Capacité calorifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	R	Constante des gaz parfaits (J/mol.K)
Q	Source de chaleur (J)	S	Surface (m^2)
T	Température (K)	t	Temps (s)
ΔH	Variation d'enthalpie (J.kg^{-1})	\tilde{t}	Fonction du temps d'induction anisotherme
h	Coefficient d'échange global ($\text{W/m}^2.\text{K}$)	t_i	Temps d'induction (s)
NR	Caoutchouc naturel	t_0	Temps d'induction isotherme référence (s)
α	Taux d'avancement de la réaction de vulcanisation	T_B	Température de référence de la fonction d'inhibition (K ou °C)
n	Exposant de la fonction cinétique	φ	Flux de chaleur (W)

1. Introduction

La diminution de la consommation énergétique des procédés de moulage a fait l'objet d'actions incitatives menées à l'initiative de plusieurs états concernés par cette industrie. On peut citer notamment des études menées à l'initiative du département de l'énergie du ministère de l'industrie des USA en 2005 [1] et une initiative européenne (projet européen euRECIPE en 2007 [2]). Dans le domaine de l'industrie du caoutchouc, on peut citer une initiative du gouvernement thaïlandais en 2007 [3], une action du gouvernement malaysien pour l'industrie du caoutchouc en 2010 [4] et un programme des nations unies pour le Vietnam en 1998 [5]. Dans le domaine de la mise en forme du caoutchouc, on constate que 20 % de l'énergie consommée par les biens d'équipement provient des procédés de chauffage [3], plus de 50% des pertes thermiques sont liées à une insuffisance de maîtrise de régulation et d'isolation thermique des moules [5]. En résumé, lors de la mise en forme des matériaux

polymères avec un procédé d'injection, l'amélioration de l'efficacité énergétique des outillages est un enjeu actuel pour les industriels en termes de consommation d'énergie, de productivité et de qualité des produits. La conception des outillages évolue donc notamment vers la réduction de la masse chauffée et l'isolation thermique des moules. Dans ce travail, on s'intéresse à la maîtrise et au contrôle de la régulation thermique d'un outillage utilisé dans la mise en forme des matériaux élastomères. L'objectif visé est de proposer une nouvelle approche de la régulation de l'outillage permettant de réduire la consommation énergétique.

Bon nombre de méthodes sont relatées dans la littérature concernant l'amélioration du transfert de chaleur dans les moules et la réduction de leur consommation énergétique. On peut citer ZHAO et WANG [6] qui ont investigué l'effet de l'ajout d'une plaque isolante entre la cavité moulante et le reste du moule sur l'efficacité des échanges thermiques en comparant le temps de chauffe/refroidissement et l'uniformité de la température à la surface. Ils ont conclu que l'isolation thermique, dans le cas d'un chauffage électrique du moule, peut augmenter considérablement la vitesse moyenne de chauffage et par conséquent réduire le temps de chauffe. Ils ont montré aussi son efficacité dans la limitation des pertes thermiques de l'outillage. L'amélioration de l'uniformité de la température à la surface de la cavité moulante a été aussi confirmée en comparant les écarts de température qui sont considérablement améliorés. D'autres comme WANG, ZHAO, LI et GUAN [7] proposent un modèle numérique d'analyse des transferts thermiques dans le moule qui prend en compte l'effet du chauffage et du refroidissement, la disposition et la structure des canaux de chauffage et celui du moule sur l'uniformité de la température et l'efficacité du chauffage. En se basant sur ce modèle numérique, ils déterminent les paramètres optimaux afin de concevoir l'outillage.

Dans cette étude, on propose un outillage complexe composé d'une part d'un moule multi-empainte conçu en réduisant la masse chauffée et équipé de zones de régulation indépendantes placées au plus près de chaque cavité moulante et d'autre part, d'un bloc à canaux régulés (BCR) permettant de limiter les déchets de caoutchouc lors de l'injection. L'originalité de cet outillage consiste à isoler thermiquement le BCR du moule et les empreintes entre elles afin de mieux contrôler le champ de température dans la matière qui se transforme. Nous présentons dans un premier temps la conception et l'instrumentation du montage expérimental. Ensuite, une étude numérique 3D nous a permis de simuler les transferts de chaleur dans l'outillage et de montrer les hétérogénéités thermiques et les différences de cinétiques de vulcanisation dans chaque pièce moulée.

2. Conception de l'outil de moulage et de son instrumentation thermique

L'outil de moulage et l'instrumentation du moule inférieur sont donnés par les deux figures 1 et 2. Cet outillage est constitué de trois parties essentielles : Le moule, le plateau chauffant et le bloc à canaux régulés qui sont constitués d'un alliage d'acier bon conducteur de la chaleur et de bonnes propriétés mécaniques.

Le moule que nous avons conçu se présente en deux parties : une partie supérieure (Figure.1-d) qui est un bloc d'acier chauffé par le plateau chauffant (Figure.1-c) fixé sur le BCR, et une partie basse (Figure.1-e) composée de six empreintes. Nous avons choisi une cavité moulante de géométrie cylindrique afin d'obtenir une cuisson symétrique de la pièce par rapport à son axe. Ceci nous permet de mieux contrôler la thermique et la vulcanisation dans la pièce dont l'épaisseur est de 7 millimètres et le diamètre de 80 millimètres. Chaque paire d'empreintes est alimentée par un point d'injection (Figure.2-a) et chauffée par deux crayons chauffants et

régulés indépendamment. Les zones de chauffe sont séparées entre elles par un matériau isolant, type Deltherm, (Figure.2-b), dont les propriétés thermophysiques sont proches de celles du caoutchouc. La régulation thermique de la partie inférieure du moule est assurée par un système de chauffage constitué par des crayons chauffants et d'alimentation en puissance électrique couplées à un système de régulation. Ce système est commandé par des régulateurs de températures (P.I.D.) programmables. Ces régulateurs permettent de commander la température séparément dans les différentes zones du moule à l'aide d'un thermocouple de régulation implanté dans chacune de ces zones. En ce qui concerne la partie supérieure du moule, elle est formée par un bloc d'acier chauffé par le plateau chauffant. Le système de régulation thermique de ce dernier est identique à celui de la partie basse du moule. Le bloc à canaux régulés (Figure.1-a), quant à lui, nous sert à injecter de la matière dans la cavité moulante et à limiter les déchets de caoutchouc. Son système de régulation thermique est assuré par une circulation d'eau à température basse pour éviter la vulcanisation prématurée dans les canaux. Il est aussi isolé du plateau chauffant par un isolant (Figure.1-b)

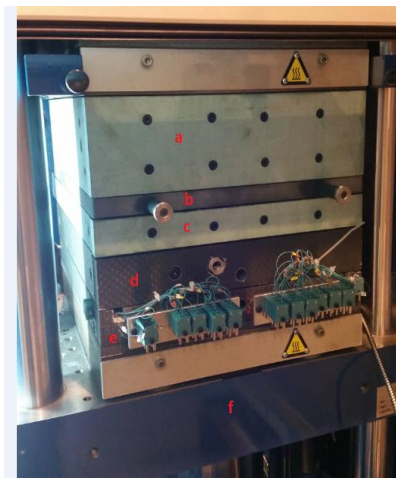


Figure.1 : L'outil de moulage.

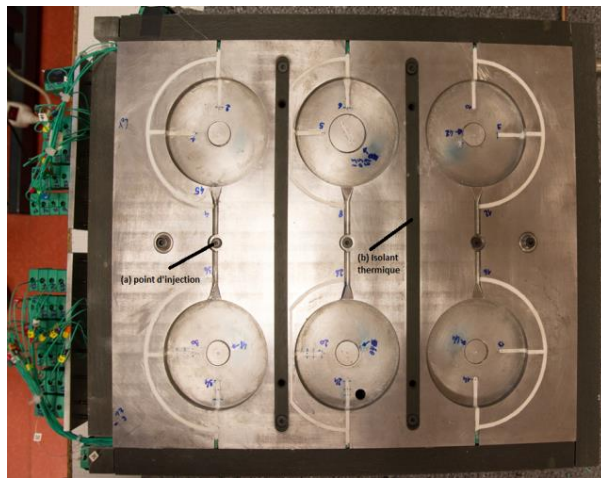


Figure.2 : Instrumentation de la partie inférieure du moule.

Les conditions de moulage sont les températures et la pression dans l'empreinte. La pression dans l'empreinte est mesurée par un capteur affleurant à la surface de la cavité. Ce capteur est de type Dynisco résistant à une température allant jusqu'à 400 °C et une pression allant jusqu'à 700 bars avec une précision de 0.1 bar. La pression n'est pas contrôlée, elle est dépendante de la force de fermeture de la presse, de la quantité de matière utilisée pour le moulage et de la dilatation du matériau lors de la cuisson. La mesure de la température dans l'empreinte et les canaux d'alimentation est assurée par des thermocouples qui passent dans des rainures réalisées dans toutes les empreintes du moule. Ces thermocouples sont situés à plusieurs positions appartenant à l'axe de chaque empreinte afin de mesurer l'évolution de la température à différents endroits de la pièce. Les thermocouples situés dans les empreintes sont de type K et de 200 µm de diamètre. Nous avons placé également des thermocouples de 50 µm de diamètre dans des rainures en contact avec les canaux d'alimentation matière. Ils sont affleurant avec le caoutchouc. Toutes ces rainures sont couvertes par de la colle à haute température afin d'éviter toute fuite de caoutchouc en dehors des empreintes et la perturbation des mesures.

3. Simulation numérique

L'objectif est de simuler les transferts thermiques dans l'outillage et la cinétique de transformation du matériau et de montrer les hétérogénéités thermiques et les différences de cinétique de vulcanisation dans chaque pièce. Pour cela, un modèle numérique 3D détaillé qui décrit les transferts de chaleur dans l'outillage et la mise en régime du moule a été développé. La modélisation thermique est couplée au modèle cinétique de vulcanisation qui permet de prédire la distribution du taux de vulcanisation. Ce modèle nous permet d'étudier notamment l'influence de l'isolation thermique sur le comportement thermique du moule et son influence sur la consommation énergétique globale.

3.1. Modélisation thermique et cinétique

Le transfert thermique au sein des différentes parties métalliques de l'outillage, est décrit par l'équation de la chaleur avec terme source (1) :

$$(\rho_m c_{pm}) \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) + Q \quad (1)$$

Le terme source Q correspond à la puissance électrique fournie par les cannes chauffantes. Cette puissance est commandée par un thermocouple implémenté dans chaque zone et régulé en « Tout ou Rien » (TOR) par rapport à une température consigne ($T_{\text{consigne}} = 180 \text{ °C}$).

Les conditions aux limites sont de plusieurs types. Nous considérons une condition de contact parfait aux interfaces métal-caoutchouc et métal-métal entre les différentes parties de l'outillage.

Sur les parois latérales de l'outillage, nous avons une condition type convectif (2) :

$$-\lambda_m \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \cdot \vec{n} = h \cdot (T - T_{\text{ext}}) \quad (2)$$

Avec $h=20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ est le coefficient de transfert de chaleur global (convection naturelle et rayonnement) et T_{ext} est pris égale à 20 °C . Ce coefficient moyen a été déterminé expérimentalement lors d'une mesure chez un partenaire industriel. Plusieurs auteurs ont pris cette valeur dans leur calcul numérique ([6], [7]).

La partie supérieure du BCR est en contact avec le plateau chauffant de la presse. Pour simplifier la géométrie et réduire le temps de calcul, nous avons appliqué un coefficient d'échange de type convectif sur la partie supérieure du BCR ($h=1.86 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

La partie basse du moule est isolé par un isolant et en contact avec le plateau chauffant inférieur de la presse. Le coefficient de transfert est de $h=2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ces deux derniers coefficients de transferts ont été calculés à partir d'un modèle simplifié de résistances thermiques équivalentes. Comme condition initiale, on suppose que la BCR est préchauffé à 80 °C et régulé par un thermostat d'eau à 80 °C . La température du reste de l'outillage est prise égale à la température ambiante (20 °C).

L'équation de la chaleur dans le caoutchouc est donnée par l'équation 3 :

$$(\rho_{NR} c_{NR}) \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda_{NR} \nabla T) + \rho_{NR} \cdot \Delta H \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

Le dernier terme de l'équation 3 représente la source thermique due à la vulcanisation. L'expression du terme cinétique en mode anisotherme est donnée par l'équation d'Isayev & Deng ([8] et [9]), équation 4.

$$\frac{d\alpha}{dt} = n \cdot k^n \cdot \alpha^{\frac{n-1}{n}} \cdot (1 - \alpha)^{\frac{n+1}{n}} \quad (4)$$

Avec $k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$

et $\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_i(T)}$

$$\begin{cases} n = 1,5978 \\ k_0 = 1,402 \cdot 10^{20} \text{ s}^{-1} \\ \frac{E}{R} = 2,4603 \cdot 10^4 \text{ K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_i = t_0 \exp\left(\frac{T_B}{T}\right) \\ t_0 = 3,3378 \cdot 10^{-9} \text{ s} \\ T_B = 1,0376 \cdot 10^4 \text{ K} \end{cases}$$

Les propriétés thermophysiques des matériaux constituant l'outillage et le caoutchouc sont données par le tableau suivant :

	λ	ρ	C_p
	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
NR : caoutchouc naturel	0,289	1214	f(T)
Acier	20	7800	460
Isolant intérieur PYROPEL MD 18	0,27	1900	1140
Isolant Extérieur PISO 350 R	0,3	290	1200

Avec $f(T) = 1684,94 + 0,954557 \cdot (T - 273,15)$

Tableau.1: Propriétés thermiques du caoutchouc, de l'acier et de l'isolant.

Le logiciel de calcul par éléments finis Comsol-Multiphysics est utilisé pour résoudre l'ensemble des équations régissant le transfert de chaleur au sein de l'outillage et de l'empreinte. Le maillage retenu contient quelques milliers d'éléments triangulaires. Le maillage est raffiné dans les canaux d'alimentation.

4. Résultats et Discussions

Nous présentons sur les figures 3 et 4, une cartographie de l'évolution au cours du temps de la température dans l'outillage, les profils de température et le taux de vulcanisation en trois points de mesure : A-centre de l'empreinte centrale ; B et C- centre des deux empreintes périphériques.

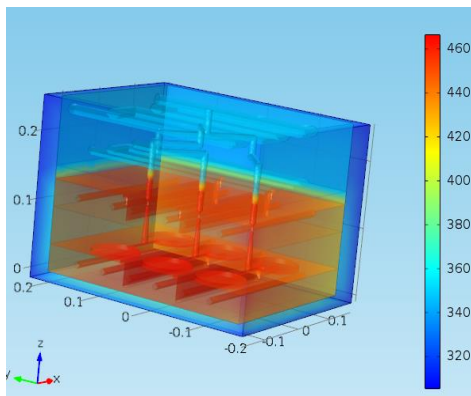


Figure.3 : Distribution de la température dans l'ensemble de l'outillage

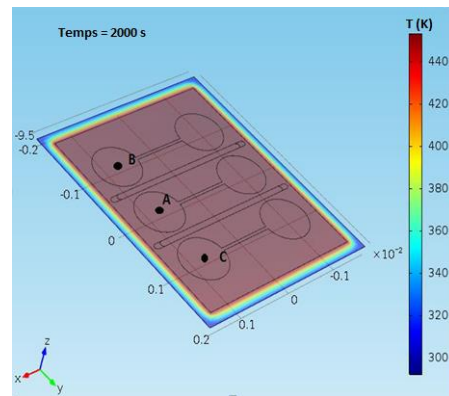


Figure.4 : Profil de température en trois points de mesures

Afin d'étudier l'influence de l'isolation thermique sur le comportement thermique du moule, 4 configurations de l'outillage ont été simulées.

Cas de simulation	Description
1	Isolation intérieure pas d'isolation externe
2	Outillage isolé
3	Outillage non isolé
4	Pas d'isolation intérieure isolation externe

Tableau. 2 : Les différentes configurations de l'isolation thermique de l'outillage

Sur la figure 5, nous traçons l'évolution au cours du temps de la température au centre de l'empreinte centrale de la partie inférieure du moule (Point A) pour les différents cas de simulation. La figure 6 présente le taux de vulcanisation au centre de l'empreinte centrale pour les différents cas de simulation.

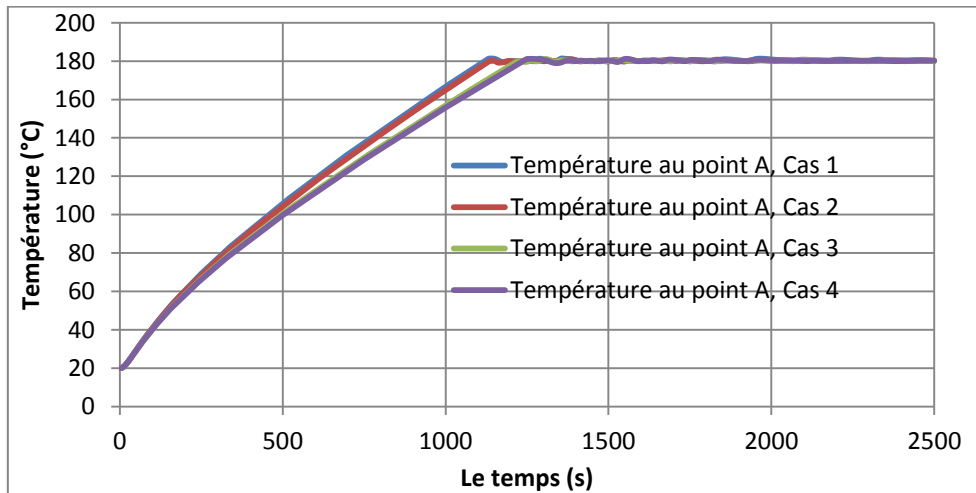


Figure.5 : Profils de température pour les différents cas de simulation point A, empreinte Centrale, moule inférieur.

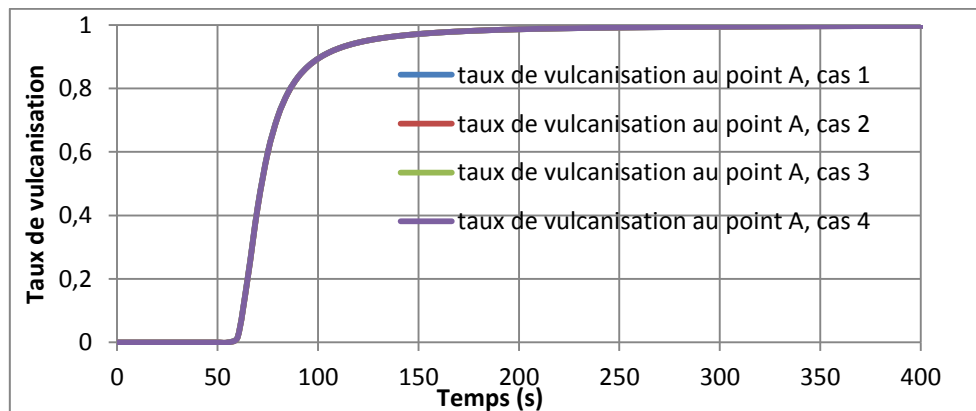


Figure.6 : Taux de vulcanisation pour les différents cas de simulation, empreinte centrale

On constate d'après la figure 5, qu'en présence de l'isolation interne (zones de chauffes isolées entre elles, cas 1 et cas 2), la vitesse de chauffe est plus importante. En effet, la température atteint sa valeur maximale à environ 1130 s et 100 s plus tard pour les cas 3 et cas 4. Ceci peut s'expliquer par la présence de l'isolation des zones de chauffe entre elles, ce qui diminue légèrement la masse de moule à chauffer (acier remplacé par de l'isolant). Lorsque le moule est isolé avec un isolant extérieur, la vitesse de chauffe diminue légèrement (comparaison entre les cas 1/cas 2 et les cas 3/cas 4). En effet, la surface d'échange avec l'extérieur augmente, les pertes également, ce qui retarde la mise en régime.

On remarque, d'après la figure 6, que les taux de vulcanisation sont confondus. En effet, lorsque la cavité moulante atteint les 180 °C, la matière est injectée, ce qui explique le démarrage de la réaction aux mêmes instants.

Le tableau 3 présente la masse de l'acier et de l'isolant intérieur pour chaque configuration ainsi que la chaleur qu'il faut fournir pour monter en chauffe. On remarque que le cas 3 et le cas 4 consomment plus d'énergie, d'où la mise en régime de l'outillage est plus lente comparée aux cas 1 et 2.

Cas	Masse d'acier (kg)	Masse isolant interne (kg)	Chaleur fournie (kJ)
1	106	0.83	49,7
2	106	0.83	49,7
3	110	X	50,6
4	110	X	50,6

Tableau.3 : Masse et chaleur fournie pour chaque cas

Un bilan énergétique réalisé sur l'ensemble du système, nous permet de comparer la consommation énergétique entre les différents cas de simulation

$$\text{Avec : } \varphi_e = \varphi_{st} + \varphi_s \quad (5)$$

$$\varphi_e : \text{Somme des puissances injectées par les crayons chauffants} \quad (6)$$

$$\varphi_{st} = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

$$\varphi_s = \sum \phi_{pertes} = h \cdot S \cdot (T_p - T_{ext}) \quad (8)$$

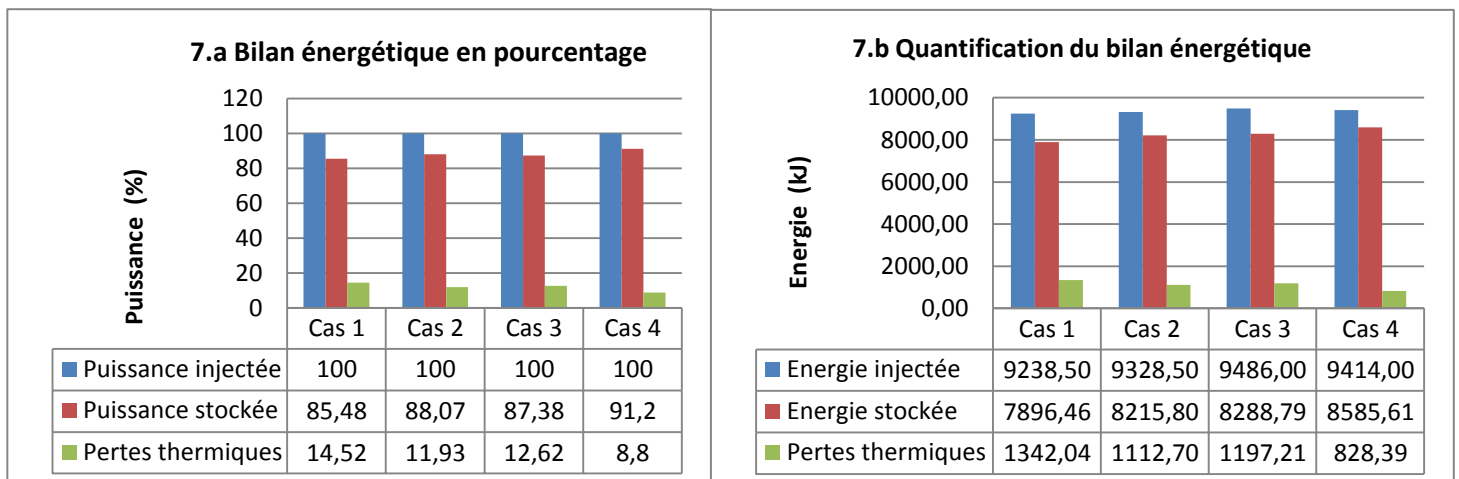


Figure.7 : Bilan énergétique des différents cas de simulation

On constate d'après la figure précédente, qu'en présence de l'isolation extérieure (outillage isolé du milieu extérieur, cas 2 et cas 4), les pertes thermiques diminuent et la puissance stockée augmente légèrement. Ceci s'explique par la limitation des échanges thermiques avec l'extérieur. Par conséquent, ceci nous permettra d'atteindre une mise en régime de l'outillage plus rapide. En présence de l'isolation intérieure, zones de chauffes isolées, les pertes thermiques sont également diminuées (comparaison entre le cas 1 et le cas 3). En effet, plus il y a l'isolation interne et plus la puissance stockée est importante.

5. Conclusion

Dans ce travail, un outillage conçu en réduisant la masse chauffée et équipé de zones de chauffe indépendante placées aux plus près de la cavité moulante et isolées entre elles a été présenté. Un modèle numérique 3D nous a permis de simuler les transferts de chaleur dans l'outillage et la cinétique de vulcanisation dans chaque pièce. Ce modèle nous a permis de montrer les hétérogénéités thermiques et les différences de cinétique pour 4 configurations d'isolation différentes.

Les résultats obtenus démontrent l'intérêt de l'isolation thermique pour une telle conception. En effet, elle permet d'atteindre la limite supérieure de la température en un temps réduit, et par conséquent réduire le temps de chauffage. La vitesse de chauffage est également améliorée ainsi les pertes thermiques. Par la suite, ces résultats seront comparés aux mesures expérimentales obtenues grâce à l'instrumentation de l'outillage. Ces mesures nous permettront de valider le modèle numérique et d'envisager une optimisation de la régulation.

Remerciement

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude aux partenaires du projet ISI ECOTHER financé par la BPI regroupant des acteurs industriels de la filière caoutchouc et des laboratoires universitaires

Références

- [1] The Society of the Plastics Industry, I., Energy, U.S.D.O., 2005. Improving Energy Efficiency at U.S. Plastics Manufacturing Plants Summary Report and Case Studies, In: The Society of the Plastics Industry, I. (Ed.). U.S. Department of Energy, Washington, DC....
- [2] Smithers, 2007. Reduced Energy Consumption in Plastics Engineering RECIPE EIE/04/153/S07.38646. European Commission, Shropshire.
- [3] Project, 2007. Project on Studying of Energy Efficiency Index in Rubber Industry. Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy, Bangkok.
- [4] Saidur, R., Mekhilef, S., 2010. Energy use, energy savings and emission analysis in the Malaysian rubber producing industries. *Applied Energy* 87, 2746-2758.
- [5] Report, 1998. Seminar on energy conservation in rubber industry. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) Ministry of International Trade and Industry (MITI), Japan, Hanoi.
- [6] G. Wang, G. Zhao, H. Li, et Y. Guan, « Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating », *Mater. Des.*, vol. 31, no 1, p. 382-395, janv. 2010.
- [7] X-P. Li, G-Q. Zhao, Y-J. Guan, M-X. Ma « Optimal design of heating channels for rapid heating injection mold based on response surface and algorithm genetic », *Journal Of Materials Processing Technology* 208, p. 222-228, 2008.
- [8] A. ISAYEV, M. WAN, RUBBER CHEM. TECHNOL 69, 277 (1996).
- [9] Labban, A.E., Optimisation du cycle de cuisson d'une pièce moulée en élastomère. 2008.