

MODELISATION BIDIMENTIONNELLE DE LA PHASE DE REMPLISSAGE DES MOULES

M. Hecini * & H. Benmoussa **

* Département de Génie Mécanique, Université Mohamed Khider, B.P. 145 R.P, 07000 Biskra, Algérie.

** Département de Génie Mécanique, Université de Batna, 05000 Batna, Algérie.

RESUME

Cette étude consiste à modéliser les phénomènes de transfert de masse et d'échange de chaleur pendant la phase de remplissage du procédé du moulage par injection des matières plastiques. La méthode consiste à mettre à plat la pièce tridimensionnelle et à découper la géométrie bidirectionnelle ainsi obtenue en géométries élémentaires (canal, disque et plaque). La description d'un moule (ou pièce) complexe conduit donc à la définition d'un réseau. Le polymère est supposé incompressible à comportement visqueux suivant une loi de puissance thermodépendante.

La résolution couplée des équations de la mécanique et de la thermique permet de déterminer les caractéristiques rhéologiques au cours et en fin de remplissage.

Mots clés : Moulage par injection, Matières plastiques, Simulation, Phase de remplissage, Transfert de masse, Transfert de chaleur.

ABSTRACT

This study consists on modelling the transfer phenomena of mass and heat during the filling stage of the plastic injection molding process. The method consists on the flat laying the three-dimensional part and cutting out the obtained bidirectional geometries in elementary geometries (tubular, disk and plate). The description of the complex mould (or piece) leads then to the definition of a network. The polymer behaviour is supposed incompressible and have a viscous according to a law of thermodependent power.

The coupled resolution of the equations of mechanics and thermic allows to determine the rheological characteristics during and at the end of the filling.

Key words : Injection molding, Plastics, Simulation, Filling stage, Transfer of mass, Heat transfer.

INTRODUCTION

Les progrès enregistrés dans le domaine de la chimie organique inventent chaque jour des matières plastiques nouvelles dont les caractéristiques atteignent, aujourd'hui de telles performances que leur utilisation est étendue à des applications de plus en plus nombreuses et exigeantes. De ce fait la pièce en matière plastique n'est plus seulement une pièce à utilisation domestique, mais aussi une pièce technique assumant des fonctions très précises dans des systèmes mécaniques. Cette diversité de domaine d'utilisation des matières plastiques avec leur exigence au point de vue qualité, délai et performance rend insuffisantes les méthodes traditionnelles basées sur la simple expérience du mouliste. En effet, bien souvent la phase fondamentale qui est la conception de la pièce est ponctuée de décisions basées sur des estimations approximatives et parfois hasardeuses, ce qui affecte grandement la qualité du produit fini.

L'industrie de plasturgie est confrontée actuellement à des contraintes économiques et qualitatives plus sévères auxquelles elle doit faire face, et cela en développant ses moyens de production ainsi que ses outils d'aide à la prise de décision. Ce développement ne peut d'ailleurs être fait qu'en combinant d'une part les connaissances scientifiques écrites et formulées, et d'autre part la compréhension des phénomènes physiques inspirés du savoir faire des moulistes.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au procédé de moulage par injection qui semble être un procédé technique largement utilisé dans la mise en forme des matières plastiques notamment dans les domaines de l'industrie automobile, électricité, électroménager, ...

En effet, l'obtention de pièces de géométrie complexe immédiatement utilisable sans retouche d'usinage et la possibilité d'utilisation pour la

production en grande série présentent quelques avantages de ce procédé.

L'outil de fabrication des pièces moulées par injection est le moule monté sur une presse à injection. Le temps de fabrication d'une pièce par ce procédé est appelé cycle de moulage qui est le plus souvent décomposé en trois phases distinctes dans le temps (Figure 1)[1],[2]:

Phase 1 : remplissage de l'empreinte

La matière portée à la température de fusion (d'environ 250°C) est injectée dans un moule froid pendant une courte durée.

Phase 2 : compactage

L'empreinte étant remplie, la matière est alors compactée à pression constante, ce qui a pour effet de compenser le retrait volumique qui commence à se manifester dans le moule.

Phase 3 : refroidissement

Le seuil d'injection étant figé, la pression de maintien n'est plus transmise, ainsi le retrait n'est plus compensé. La matière se rétracte dans le moule et la pièce se déforme après l'éjection.

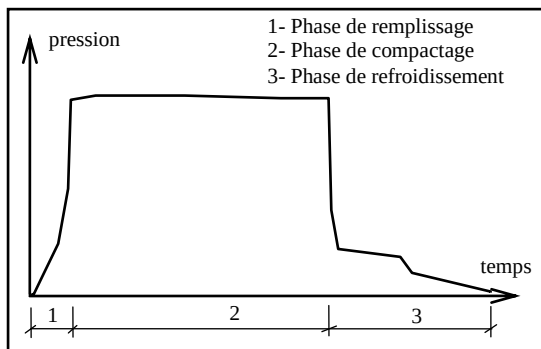


Figure1 : Cycle de moulage

La simulation numérique du cycle de moulage par injection apporte une aide significative pour la conception de la pièce plastique et des moules. En effet, les logiciels de simulation permettent de :

- tester plusieurs géométries possibles de la pièce
- tester plusieurs polymères
- vérifier l'existence ou non des zone d'échauffement
- optimiser les paramètres d'injection notamment la pression d'injection et le système d'alimentation,
- vérifier le remplissage total du moule et son uniformité.

La structure modulaire (Figure 2) semble être la tendance actuelle de tous les logiciels commercialisés (Moldflow, C-Flow, Procop-F3D, SIGMASOFT ;...) [2] qui tentent à modéliser tout le cycle de moulage. Dans ce cas le modèle

géométrique numérisé de la pièce constitue le centre d'une logique autour de laquelle gravitent les différents modules de traitement.

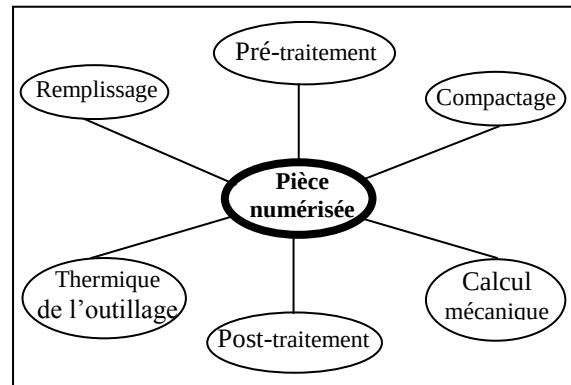


Figure 2 : Structure modulaire des codes de simulation du cycle de moulage

Dans cette étude on s'intéresse à la modélisation de la phase de remplissage qui conditionne en grande partie les propriétés finales de la pièce. Elle est la phase dynamique de transfert de matière dans le moule en un temps court. Le polymère supposé incompressible visqueux, est injecté à travers une géométrie tridimensionnelle quelconque.

L'écoulement est instationnaire. Pendant cette phase de remplissage de l'empreinte, la matière chaude va rapidement se trouver au contact d'un moule froid. Ceci engendre plusieurs phénomènes complexes dont il faut tenir compte (variation de la température, de la pression et de la densité, cristallisation et apparition des contraintes résiduelles, ...).

L'échange thermique pendant cette phase entre le polymère et le moule engendre un important gradient de température et de vitesse dans l'épaisseur ; ceci a pour conséquence une importante dissipation d'énergie due à la forte viscosité des polymères (10^6 à 10^8 fois celle de l'eau).

Cette viscosité est fonction de la température et du taux du cisaillement. Elle décroît avec l'augmentation de la température et du taux de cisaillement. Cette thermodépendance de la viscosité amène à adopter un calcul couplé entre le modèle mécanique et le modèle thermique lors de la modélisation [2].

MODELISATION DE LA PHASE DE REMPLISSAGE

La modélisation de la phase de remplissage donne l'état de la matière au cours et en fin de remplissage (pression, température, taux de cisaillement,

vitesse, ...). L'écoulement pendant cette phase est instationnaire avec une forte dissipation d'énergie et un important gradient de température dans l'épaisseur.

Les paramètres d'entrée du modèle sont la forme géométrique de la pièce (l'empreinte du moule), les propriétés du polymère et les conditions d'injection.

Modèle géométrique

La modélisation de l'écoulement du polymère est effectuée sur une géométrie plane sous forme de réseau d'éléments simples. Le passage de la géométrie tridimensionnelle, celle de la pièce réelle, à la géométrie bidirectionnelle est assuré par la méthode de mise à plat. La géométrie

bidirectionnelle ainsi obtenue sera découpée en éléments de géométrie élémentaire : plaques, secteurs et canaux cylindriques (Figure 3). Ces éléments seront connectés entre eux de manière à reconstituer l'ensemble du flux de matière dans le moule. Ce découpage en géométrie simple doit être tel qu'il suit aux mieux la géométrie issue de la mise à plat, que le volume global de la pièce soit respecté et que la longueur totale soit bien identique à la longueur d'écoulement réelle.

Les équations de la mécanique et de la thermique seront résolues pour chaque élément en tenant compte des particularités géométriques de chaque élément.

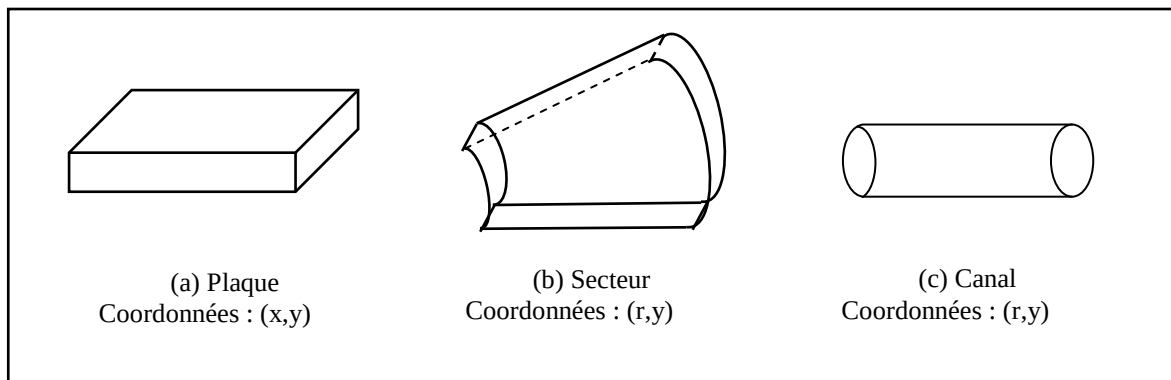


Figure 3 : Formes géométriques élémentaires

Modèle mécanique

Ce modèle doit donner le champs de la vitesse et celui de la pression dans la matière pendant l'écoulement. Il repose sur les deux principes de la physique des milieux continus, que sont [3], [4]:

- la conservation de la masse qui se traduit par l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}[\rho \vec{V}] = 0 \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique du polymère.

- la conservation de la quantité de mouvement qui se traduit par l'équation de l'équilibre dynamique :

$$\text{div}[\vec{\sigma}] + \rho(\vec{G} - \vec{g}) = 0 \quad (2)$$

où $\vec{G}$: force de masse
 $\vec{g}$: force d'inertie

Compte tenu de la symétrie dans l'épaisseur on ne modélise que la moitié de l'élément (Figure 4) en prenant les hypothèses suivantes :

- pendant tout l'écoulement le débit est constant,
- le polymère est incompressible visqueux,

- les forces de masse et d'inertie sont négligeables devant les forces de viscosité,
- la pression au front de la matière est nulle.

La résolution analytique de ces équations permet d'obtenir pour chaque géométrie la vitesse, la pression et le taux de cisaillement en chaque point de la matière ainsi que la pression d'injection au seuil [5],[6].

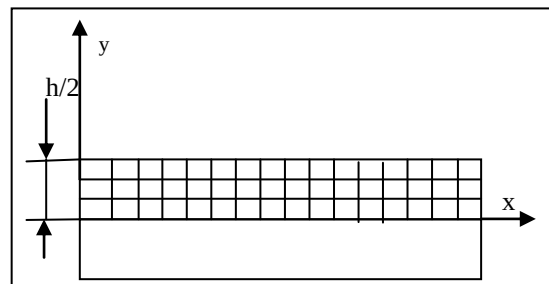


Figure 4 : Maillage de la moitié du moule

Modèle thermique

Ce modèle est basé sur le principe de conservation de l'énergie qui se traduit par l'équation de la chaleur suivante [3], [4]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \text{div}[\lambda \cdot \text{Grad}(T)] + \dot{W} \quad (3)$$

avec λ : la conductivité thermique

On considère les hypothèses suivantes:

- on néglige le terme de pression devant celui de la température
- on néglige le terme de conduction dans la direction de l'écoulement devant celui dans le sens transversal.

Le terme de dissipation visqueuse s'écrit sous la forme :

$$\dot{W} = \eta \dot{\gamma} = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Pour la résolution numérique de l'équation de la chaleur on utilise la méthode des différences finies implicites [7]. L'échange de chaleur est stationnaire.

Les conditions aux limites suivantes seront considérées :

- température imposée au seuil d'injection,
- équilibre des flux de la chaleur entre le matériau et le moule
- Symétrie par rapport au plan moyen.

Modèles de la viscosité

Considérons un liquide visqueux cisailé entre deux plaques parallèles de surface S , distantes d'une épaisseur h ; l'une des plaques est animée par rapport à l'autre d'une vitesse u . Cet écoulement est comparable à l'écoulement d'un fluide entre deux parois fixes.

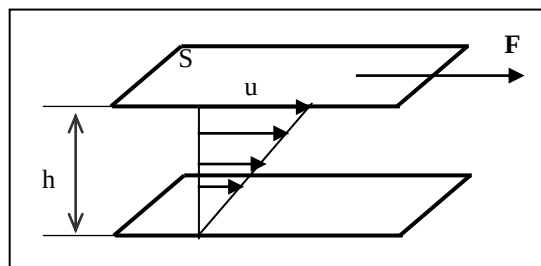


Figure 5 : Cisaillement simple d'un liquide visqueux entre deux plaques parallèles

Le taux de cisaillement est défini par [6], [7]:

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{h} \quad [s^{-1}] \quad (5)$$

La contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = \frac{F}{S} \quad [Pa] \quad (6)$$

La viscosité η est définie par le rapport entre la contrainte de cisaillement τ induite sous l'effet du déplacement de la plaque par rapport à l'autre et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ [6], [7]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [Pl \text{ (Poiseuille)} = Pa \cdot s] \quad (7)$$

Les paramètres les plus influents sur la viscosité sont le taux de cisaillement et la température. La figure 6 donne une évolution typique de la viscosité [1], [6].

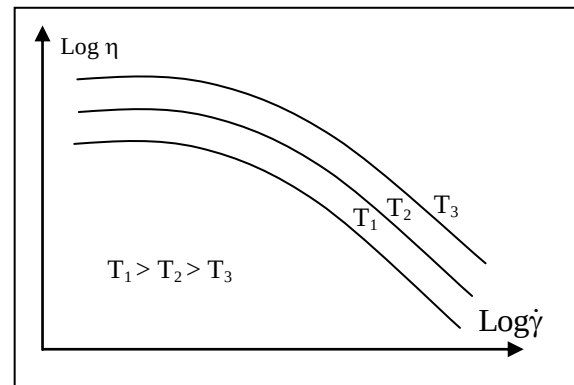


Figure 6 : Evolution typique de la viscosité en fonction du taux de cisaillement et la température

Les modèles décrivant le comportement rhéologique des polymères sont de trois types [6], [8]:

Modèle Newtonien: Pour une température et une pression données, le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ est indépendant de $\dot{\gamma}$; Dans ce cas la viscosité est constante.

$$\eta = \text{constante} \quad (8)$$

Modèle Pseudo-plastique: La pseudo-plasticité est la propriété d'un matériau qui exprime le fait que la viscosité soit une fonction décroissante du taux de cisaillement. La modélisation la plus courante de ce comportement est la loi de puissance qui s'écrit :

$$\tau = k |\dot{\gamma}|^{m-1} \dot{\gamma} \quad (9)$$

Ce qui correspond à la loi de viscosité :

$$\eta(\dot{\gamma}) = k |\dot{\gamma}|^{m-1} \quad (10)$$

où : k est la consistance du liquide

m est l'indice de pseudo-plasticité

Modèle Pseudo-plastique thermodépendant: Le modèle Pseudo-plastique thermodépendant tient compte de la variation de la viscosité en fonction du

taux de cisaillement et de la température; dans ce cas on a :

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T) \quad (11)$$

Pour exprimer cette propriété on considère dans cette étude que la consistance k du polymère dépend de la température suivant la relation :

$$k = A \exp(CT). \quad (12)$$

A et C sont des constantes du matériau

Le modèle Pseudo-plastique thermo-dépendant semble être le modèle le plus adapté à décrire le comportement rhéologique des matières plastiques [7].

ORGANIGRAMME DE LA MODELISATION

La mise à plat de la pièce et son découpage en éléments simples transforme la pièce en un réseau d'éléments. La résolution des équations de la mécanique et de la thermique s'effectue pour chaque élément. La mise en série des éléments doit assurer la continuité de la pression et de la température entre deux éléments consécutifs.

Ainsi la pression à la fin d'un élément sera égale à celle d'entrée de l'élément suivant. Tandis que la température d'entrée d'un élément sera égale à la température de mélange calculée à la fin de l'élément précédent.

L'utilisation du modèle pseudo-plastique thermodépendant de la viscosité nécessite un couplage du calcul mécanique et le calcul thermique [6], [7], [8]; ainsi une portion de la cavité du moule remplie pendant un temps $t+dt$ sera divisée en deux zones (Figure 7) :

- zone 1 : remplie entre les temps 0 et t , cette zone est le siège d'échange thermique instationnaire pendant le remplissage de la zone 2. L'équation de la chaleur sera résolue par la méthode des différences finies.

- zone 2 : remplie entre le temps t et le temps $t+dt$. La température de la matière entrante dans cette zone sera supposée égale à la température du front à la fin de la zone 1.

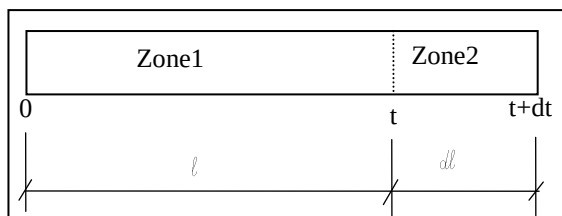


Figure 7 : Cavité remplie à l'instant $t+dt$

La résolution s'effectue selon l'organigramme ci-après (Figure 8). La programmation est réalisée sous le logiciel MATLAB.

Les paramètres d'entrée du programme sont :

- les caractéristiques géométriques de la pièce
- les caractéristiques du polymère
- les caractéristiques du moule
- les conditions d'injection

Les paramètres de sortie du programme :

Le programme donne sous forme numérique et graphique et pour chaque pas de temps les caractéristiques du polymère à l'intérieur du moule :

- température
- vitesse
- taux de cisaillement
- pression
- position du front de la matière.

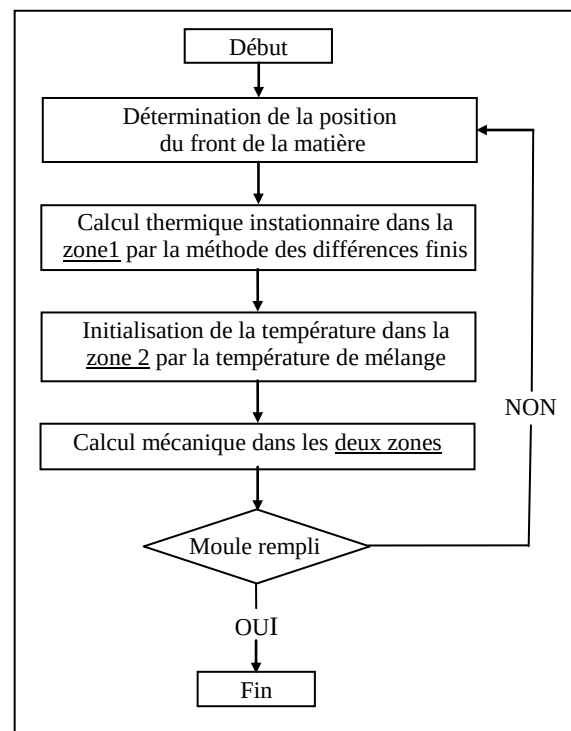


Figure 8 : Organigramme de la modélisation

ETUDE DE CAS D'UNE PIECE

La pièce injectée est constituée de trois formes géométriques élémentaires (Figures 9 et 10) :

- Canal (carotte)
- Secteur (conduction de la matière)
- Plaque (partie utile)

Caractéristiques géométriques :

Polymère [2]: $\lambda = 0,175 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$

$$\rho c = 2,02 \times 10^6 \text{ J/}^\circ\text{C.m}^3$$

Constantes de la viscosité

$$A = 43350, \quad C = -0,0088522$$

(Modèle Pseudo-plastique thermodépendant)

Moule (acier) : $\lambda_{ac} = 14,6 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$

Conditions d'injection [2] :

Débit : $Q = 8000 \text{ mm}^3/\text{s}$

Température d'injection : $T_{\text{inj}} = 250 \text{ °C}$

Température de refroidissement : $T_r = 20 \text{ °C}$

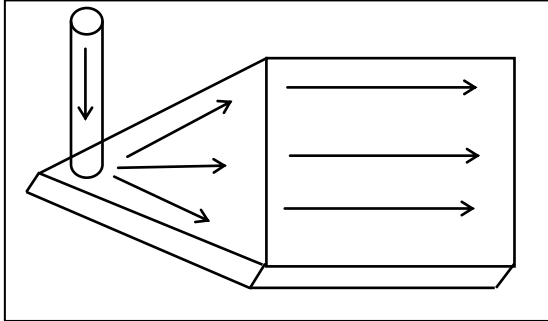


Figure 9 : Pièce injectée

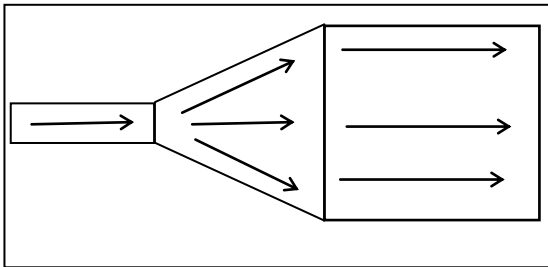


Figure 10 : Mise à plat de la pièce

La figure 11 présente le gradient de la température dans l'épaisseur dans un élément. On remarque la chute de la température au niveau de la paroi du moule. Au cœur du moule l'écoulement est isotherme. Ce gradient important de la température est dû à l'échange thermique du polymère avec le liquide de refroidissement à travers le moule.

Les faibles valeurs de la température à la paroi du moule augmentent la viscosité du polymère qui devient proche ou égale à celle du polymère solidifié (apparition de la gaine solide). A ces endroits la vitesse diminue et s'annule au contact avec le moule (Figure 12). Au cœur du moule, la vitesse est maximale. Cette variation de la vitesse du polymère dans l'épaisseur donne une allure inverse du taux de cisaillement (Figure 13).

La figure 14 donne le temps nécessaire à l'avancement du front de la matière dans le moule.

La figure 15 représente la variation de la pression entre le seuil d'injection et le front de la matière aux différents instants de remplissage.

La pression dans le moule varie de la pression d'injection au seuil jusqu'à zéro au front de la matière.

La figure 16 donne la variation de la pression d'injection en fonction de l'avancement du front de la matière dans le moule. Cette pression est la pression que doit fournir la presse pour faire avancer la matière dans le moule. Elle est de ce fait croissante.

On remarque dans ces trois dernières figures la variation de l'allure et la pente des courbes suivant les différents éléments de géométrie différente constituant la pièce.

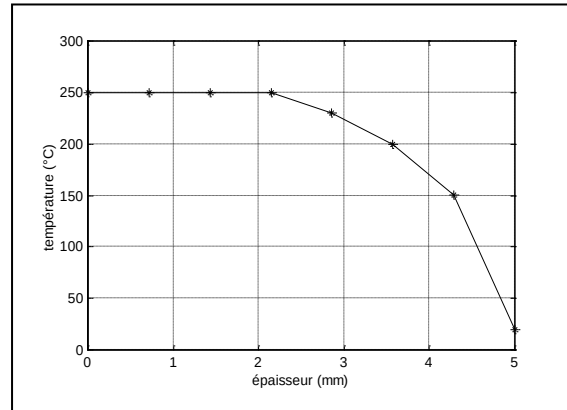


Figure 11 : Température dans l'épaisseur

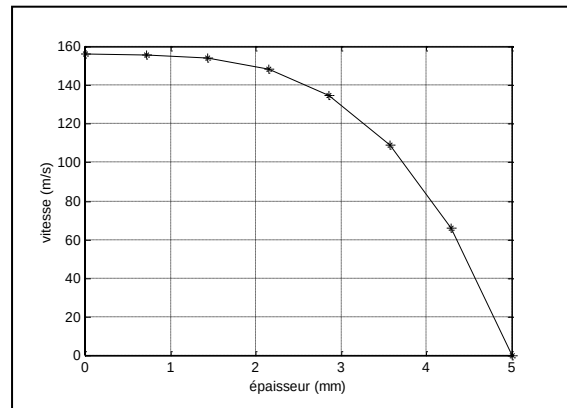


Figure 12 : Vitesse dans l'épaisseur

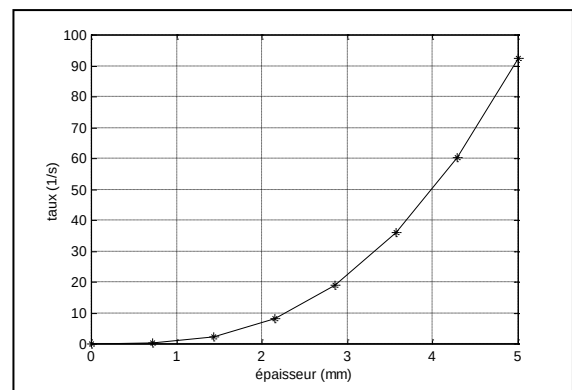


Figure 13 : Taux de cisaillement dans l'épaisseur

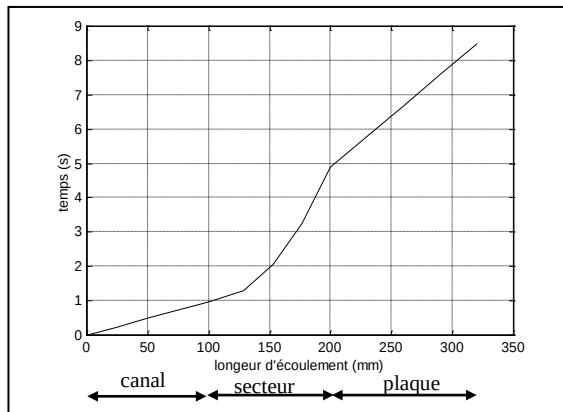


Figure 14 : Avancement du front de la matière

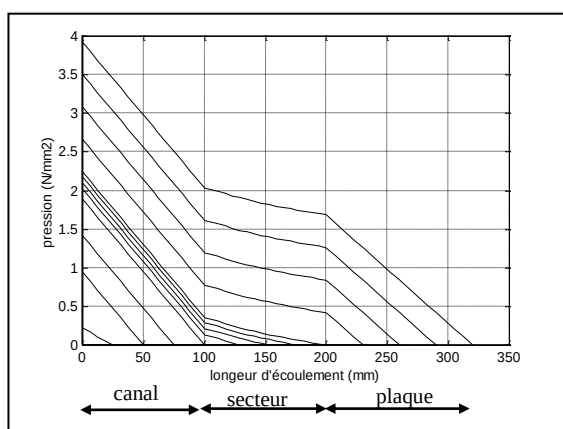


Figure 15 : Pression dans le moule

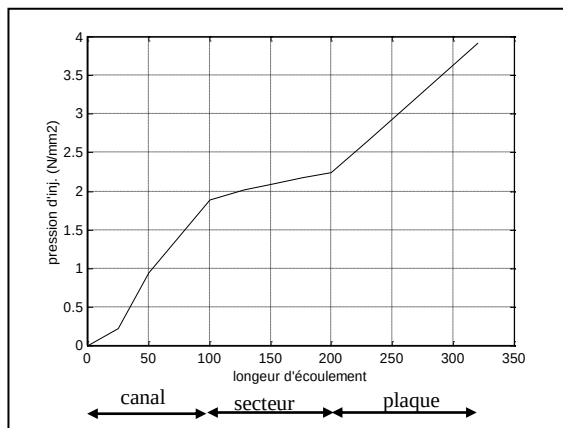


Figure 16 : Pression d'injection

CONCLUSION

La simulation de remplissage des moules est le but de cette étude. Elle a permis de déterminer les caractéristiques de la matière au cours et à la fin de cette phase. Ceci porte un outil précieux au mouliste pour le réglage de la presse d'injection et la conception des moules.

La résolution couplée des équations de la mécanique et celle de la thermique a permis de prendre en compte le caractère visqueux et thermo-dépendant du polymère dans la modélisation de l'écoulement dans le moule.

Les résultats obtenus par ce modèle sont satisfaisants du point de vue qualitatif. En effet l'allure des courbes obtenues et l'ordre de grandeur des résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux [2], [6].

La précision du calcul et la qualité des résultats peuvent être améliorées par un maillage plus raffiné dans l'épaisseur et dans le sens d'écoulement et en tenant compte de la gaine solide produite au niveau des parois du moule. D'autres méthodes peuvent être investies pour la résolution des équations d'échange thermique telles que la méthode des différences finies implicite et la méthode des volumes finis [9].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J.P. TROTIGNON, "Précis de matières plastiques", Nathan, Paris, 1991.
- [2] M. HECINI, "Modélisation des déformations des pièces injectées en thermoplastique", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM)-Paris-France, 1992.
- [3] J. COIRIER, "Mécanique des milieux continus, concepts de base", Dunod, Paris, 1997.
- [4] D. GARCIA, G. COURBEBASSE, M. JOURLIN, "Image analysis dedicated to polymer injection molding", Image Anal Stereol, 2001, 20, p143-148.
- [5] M. HECINI, A. TATI, M. HADID, "Modélisation de la phase de remplissage du moulage par injection des matières plastiques", 6^{ème} Journées Maghrébines sur les Sciences des Matériaux, Annaba, Nov. 1998.
- [6] J.F. AGASSANT, P. AVENAS et J.Ph.SERGENT, "La mise en forme des matières plastiques", Technique et Documentation-Lavoisier, 1986.
- [7] M. HECINI, H. BENMOUSSA, "Echange thermique au cours du moulage par injection des matières plastiques", 10^e Journées Internationales de Thermique, Tunis, Sept. 2001.
- [8] M. HECINI; BENSALAH O.S., "Influence des modèles de viscosité sur la simulation du moulage par injection des matières plastiques", 4^e Journées Maghrébines d'Etudes de Génie Mécanique, Constantine, Nov. 1999.
- [9] LOTHAR H. KALLIEN, JORG STEINBACH, "Simulation of injection moulding with 3D volume elements", 18 CAD-FEM Users' Meeting, 22-22 Sept. 2000, Graf-Zeppelin-Haus, Germany.