

Modélisation numérique du champ de température en 2D dans la zone de refroidissement primaire de la machine de coulée continue

Abnane ¹, Bellaouar Ahmed ² and Lachi Mohammed ³

¹ département de génie mécanique, université du 20 Août, Skikda, Algérie

² laboratoire ingénierie de transport et environnement, Faculté des sciences de l'ingénieur, université Mentouri de Constantine, Constantine, Algérie

³ laboratoire LTM/ GRESPI, Faculté des Sciences, Université de Reims-Champagne-Ardennes, Reims, France

Resumé La qualité des demi-produits est conditionnée par les conditions de refroidissement de l'acier liquide lors de son transport à travers les différents changeurs et en particulier le moule qui représente la zone de refroidissement primaire. Ce dernier constitue la première phase où l'acier liquide commence à se solidifier. La croûte solidifiée instantanée doit être suffisamment consistante pour contenir l'acier liquide et éviter ainsi les phénomènes de percée sous l'effet de la pression hydrostatique.

L'objectif de ce travail est de modéliser le champ de température et d'écoulement en 2D d'un acier inoxydable en fonction de la vitesse de coulée, de la nuance d'acier et de la géométrie de la busette (angle de sortie). Les courbes obtenues expriment les profils de température différents dans le moule. La simulation numérique est réalisée avec le logiciel commercial FLUENT 6.0. Seule la moitié du domaine a été considérée en raison de la symétrie.

Keywords: Moule ; Vitesse ; Température ; refroidissement primaire ; Coulée continue ; acier inoxydable

I. INTRODUCTION

Le processus de coulée occupe une place importante dans l'industrie métallurgique. Dans le passé, le procédé de coulée en lingot (brames, billettes...) a été généralement employé. Le processus de coulée continue a remplacé cette méthode plus tôt en raison des avantages inhérents de l'épargne d'énergie, de la productivité augmentée, du plus grand rendement et des coûts réduits [6]. L'acier en fusion contenu dans une poche est coulé dans une lingotière sans fond carrée, rectangulaire, ronde (selon le produit fabriqué). L'acier liquide au contact avec la lingotière, va se solidifier et une peau solide commence à se former. On parle ici de refroidissement primaire [5].

Parmi les préoccupations récurrentes de l'industrie sidérurgique figure la maîtrise du contenu inclusionnaire dans les alliages métalliques [2].

La qualité de coulée continue de l'acier est considérablement influencée par l'écoulement du fluide dans le moule [1]. La maîtrise de la qualité du métal, se fait par la décantation des inclusions non-métalliques et leur piégeage dans la couche de laitier induit par l'écoulement de l'acier liquide, à partir du réglage de certains paramètres de coulée tels que la vitesse de coulée, de l'intensité de refroidissement et de la géométrie du moule.

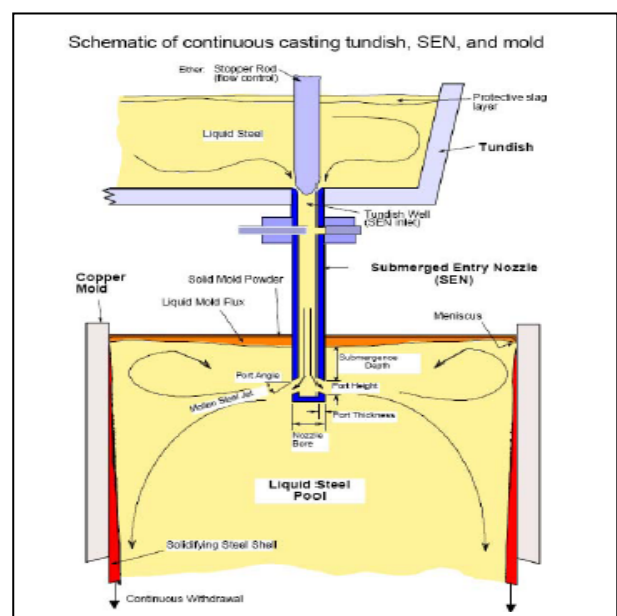


Figure 1. Schématisation du processus de coulée dans le répartiteur, busette et moule

Dans le processus de coulée continue, illustré dans la figure 1 [7], le métal fondu est livré du répartiteur (Tundish) dans le moule à travers la busette. Les parois du moule sont refroidies par de l'eau dont l'objectif est d'extraire la chaleur pour former une peau solide permettant de supporter la pression ferrostatique du liquide afin d'éviter le phénomène de percé à la sortie du moule

II. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

La nuance étudiée est celle de l'acier inoxydable 434, utilisée dans la coulée des brames, et dont les principales propriétés physiques sont données au tableau 1 [1]:

- Les vitesses de coulée testées sont les suivantes : $V_c = (3), (1,8), (1,2), (0,8)$ en (m/min)
- Dimension du moule: $(0,9 - 0,325) \text{ m}^2$

Tableau 1 . Propriétés physiques de l'acier liquide inoxydable

propriétés	Unités	valeurs
Conductivité thermique	W/m.K	26
Masse volumique (ρ)	Kg /m ³	7020
Chaleur spécifique	J/Kg.K	680
Température de liquidus	K	1775
Viscosité dynamique	m ² /s	$7,98 \times 10^{-7}$
Température de coulée	K	1832

III. GÉOMÉTRIE DE LA BUSETTE

Dans la présente étude, on a considéré deux formes géométriques de la sortie de busette (normale et inclinée) sans changement des dimensions du moule comme présenté à la figure 2.

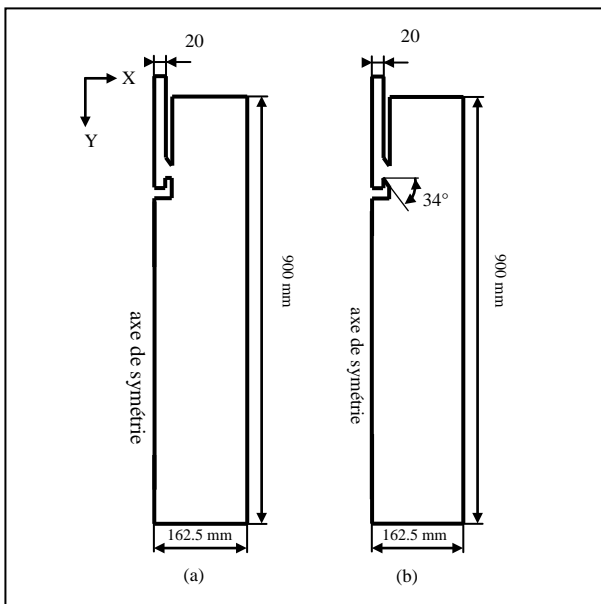


Figure 2. Schématisation axisymétrique du moule, (a) busette normale, (b) busette inclinée.

La formulation mathématique du transfert thermique est basée sur l'équation fondamentale de la conduction de la chaleur.

Pendant le processus de coulée continue, la distribution de la température est décrite par l'équation de la conduction de chaleur sous sa forme générale exprimée par l'expression (1) [6] [3] [8] :

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q^*$$

Où $k(T)$ est la conductivité thermique [W/m.K]; $C_p(T)$ la chaleur spécifique [J/kg.K]; $\rho(T)$ la masse volumique [kg/m³]; T la température [K]; q^* le terme source [W/m³]; t le temps [s] et x, y et z sont les coordonnées rectangulaires [m] [6].

Le dégagement de la chaleur latente (entre la température du liquidus et celle du solidus) est exprimé par q^* [6]:

$$q^* = \rho(T)_s \cdot L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

Où L est la chaleur latente de fusion [J/kg], f_s la fraction solidifiée, $\rho(T)_s$ la masse volumique du solide [kg/m³].

Après substitution de l'équation (2) dans (1) on obtient la formule de l'enthalpie :

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = C_p(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \rho(T)_s \cdot L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

Où $H(T)$ est l'enthalpie [J/m³]

La fraction solidifiée de l'acier est une fonction parabolique de la température, donnée par la relation (4) [4]:

$$f_s = 1 - \left(\frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^2$$

Où T_l est la température liquidus, T_s la température solidus.

Finalement l'équation de conduction de la chaleur peut être décrite par l'expression suivante :

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Où sous la forme ci après

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \nabla(k(T) \cdot \nabla T)$$

V. CONDITIONS AUX LIMITES

Sur la paroi du moule est imposée la condition de non glissement pour les composantes tangentielles de vitesse et de flux :

$$k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -\Phi_s$$

Φ_s est le flux de la chaleur [W/m²].

- Pour la surface libre, les conditions des contraintes et flux sont nulles.

▪ A l'entrée les valeurs initiales de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation sont estimées selon les équations suivantes [2]:

$$k_{in} = 0,01 \cdot u_{in}^2 \quad \text{et} \quad \varepsilon_{in} = k_{in}^{1,5} / R$$

▪ Pour réaliser l'état d'équilibre, le débit d'écoulement à la sortie est égal à celui à l'entrée, c-à-d : selon l'expression $A_{inlet} \cdot U_{inlet} = A_{outlet} \cdot U_{outlet}$, U_{inlet} correspond à la vitesse d'entrée et U_{outlet} la vitesse de sortie correspondant à la vitesse de coulée de la machine. Ces valeurs ont été calculées dans le modèle [7].

▪ Pour les conditions thermiques, la température d'entrée est imposée $T_{inlet} = 1832 \text{ k}$, soit 1559 C° .

▪ Le flux thermique évacué par les faces du moule, diminue de façon linéaire lorsqu'on passe du niveau ménisque au bas du moule, par la relation suivante [4]:

$$\Phi_s (w/m^2) = (1,0 - 0,9 \cdot h) \cdot 10^6$$

Où h est la position de la tranche d'acier considérée par rapport au niveau du ménisque.

VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION

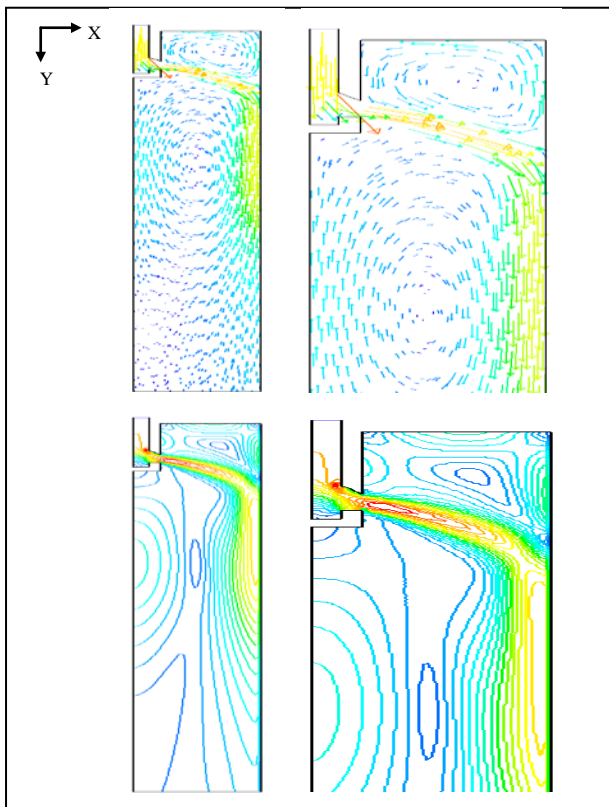


Figure 3. a. Vecteur de vitesse en (m/s) d'un acier inoxydable à une vitesse de coulée $V_c = 1,8 \text{ m/min}$: (busette normale)

A la figure 3 (a,b) sont présentés respectivement les profils de vitesse dans le cas de la busette normale (a) et dans le cas de la busette inclinée à la sortie d'un angle de 34° à une vitesse de coulée $1,8 \text{ m/min}$. On remarque bien que la zone

de recirculation sous l'effet de l'inclinaison est beaucoup plus développée que celle de la busette normale. Ceci laisse supposer que le temps de séjour dans cette zone est relativement élevé, d'où la probabilité d'en décanter encore des particules non métalliques vers la surface libre du moule.

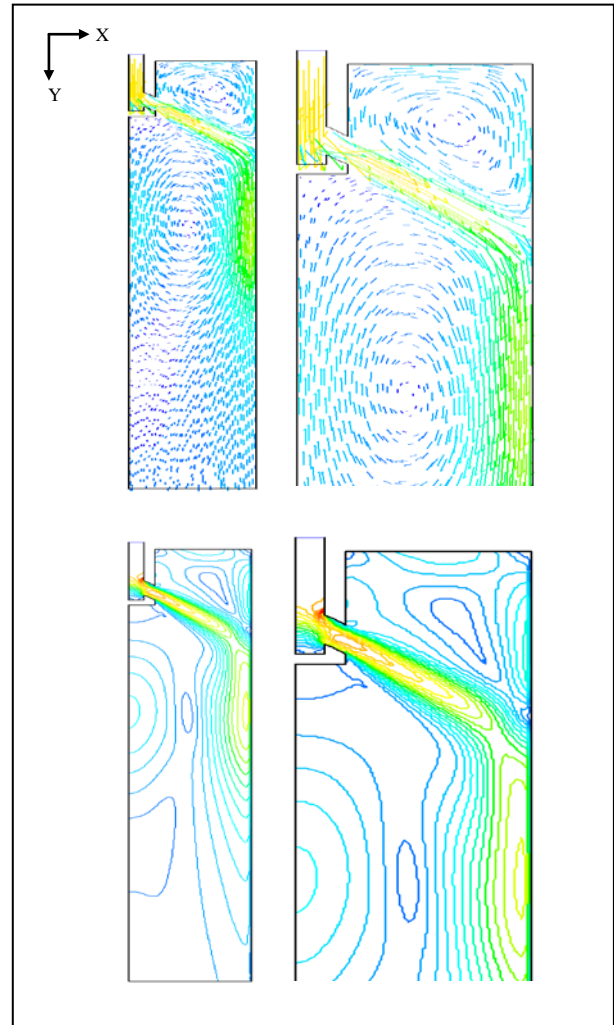


Figure 3.b. Vecteur de vitesse en (m/s) d'un acier inoxydable à une vitesse de coulée $V_c = 1,8 \text{ m/min}$: (busette inclinée)

Sur la figure 4 (a,b) sont présentés les profils de température obtenus dans les deux cas. On peut ainsi remarquer que la chute de température dans le moule avec la busette inclinée est importante par rapport au cas normal. Ceci est dû à l'importance de la zone de recirculation qui provoque un double effet à savoir un flux ascendant facilitant le piégeage et la décanation des inclusions non métalliques à la surface libre et par la suite la formation instantanée de la croûte solidifiée en temps utile afin d'éviter les contraintes de percée sous l'effet de la pression ferrostatique à la sortie du moule.

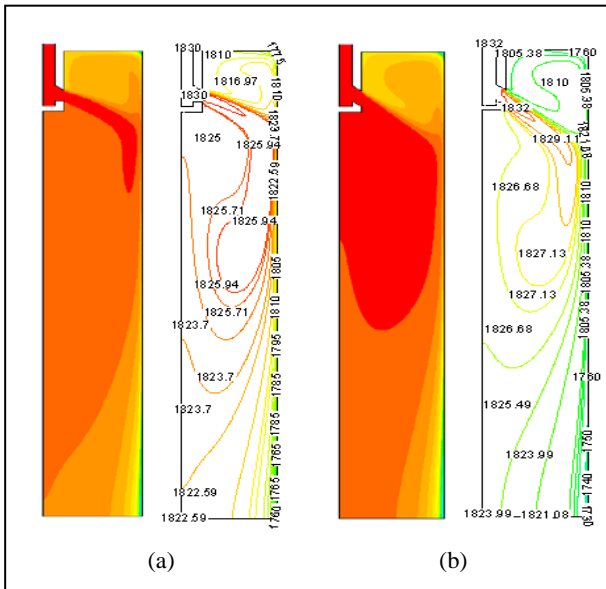


Figure 4. Champ de température en (K) d'un acier inoxydable à une vitesse de coulé $V_c = 1,8$ m/mn : (a) busette normale ; (b) busette inclinée

La figure 5 montre le profil de température au niveau de la paroi du moule pour différentes vitesses de coulée de l'acier inoxydable, dans (a) on constate une augmentation de la température à partir de la surface libre, l'écoulement engendré par le contact de l'acier liquide avec la paroi du moule, génère une zone de recirculation, en suite une variation de l'épaisseur de la peau solidifiée est constatée en passant d'une vitesse à une autre. En (b) on voit que la température à l'intérieure de la busette est égale la température de coulée c'est à dire $T_{inlet} = 1832K$, une fois l'acier liquide quitte la busette, une faible diminution de la température au milieu du moule est apparue, ce qui explique un refroidissement par les frontières du moule ce qui conduit à la formation de trois zones (liquide, pâteuse, solide). La figure (c), montre la variation de température à la sortie du moule, où on peut remarquer une chute brusque en s'approchant de la paroi ce qui explique la formation de la croûte solide.

A la figure 6 sont présentés les profils de température de deux nuances d'acier (inoxidable 434 et XC 40) de conductivité différentes le long de la paroi du moule, au milieu et à la sortie coulés à la vitesse 1.8m/min . Le décalage entre les courbes exprime la bonne concordance du refroidissement et de la compatibilité du modèle numérique de prédiction étudié dans notre cas.

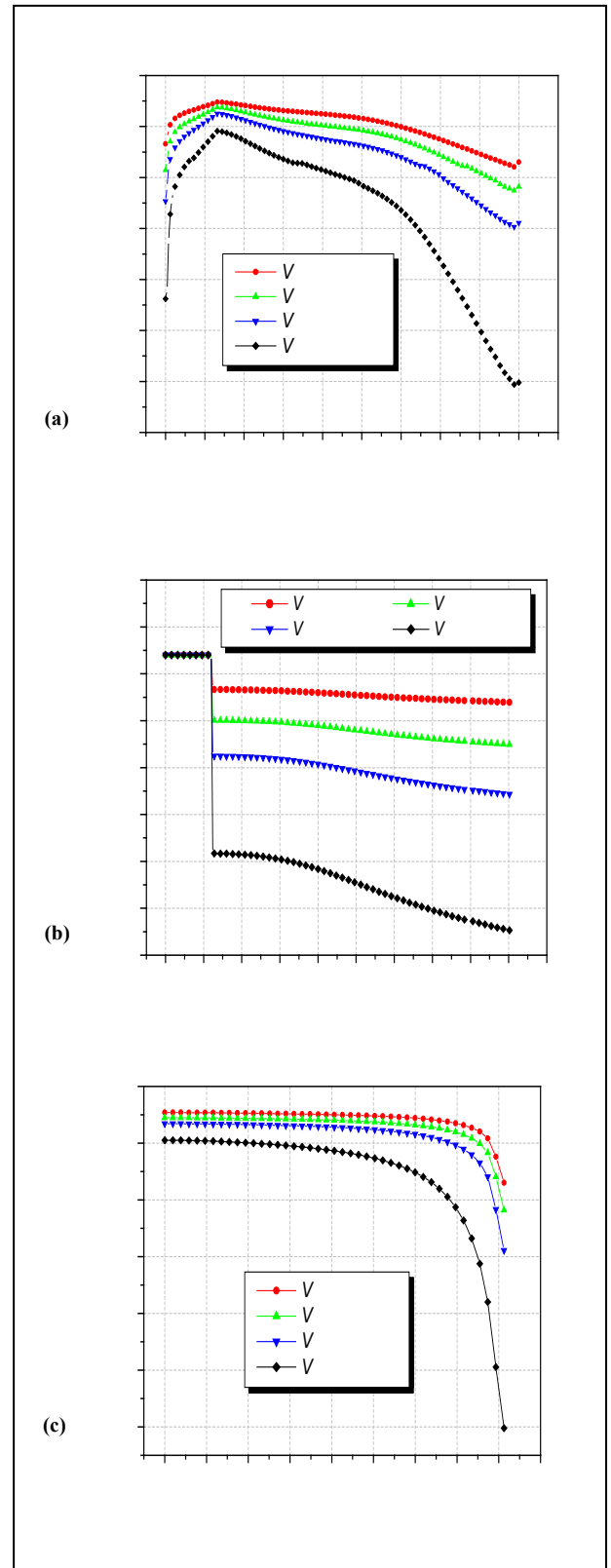


Figure 5. Profil de température en (K) pour différentes vitesses de coulée d'un acier inoxydable ; (a) au niveau de la paroi du moule ; (b) au niveau de l'axe de symétrie du moule ; (c) au niveau de sortie du moule

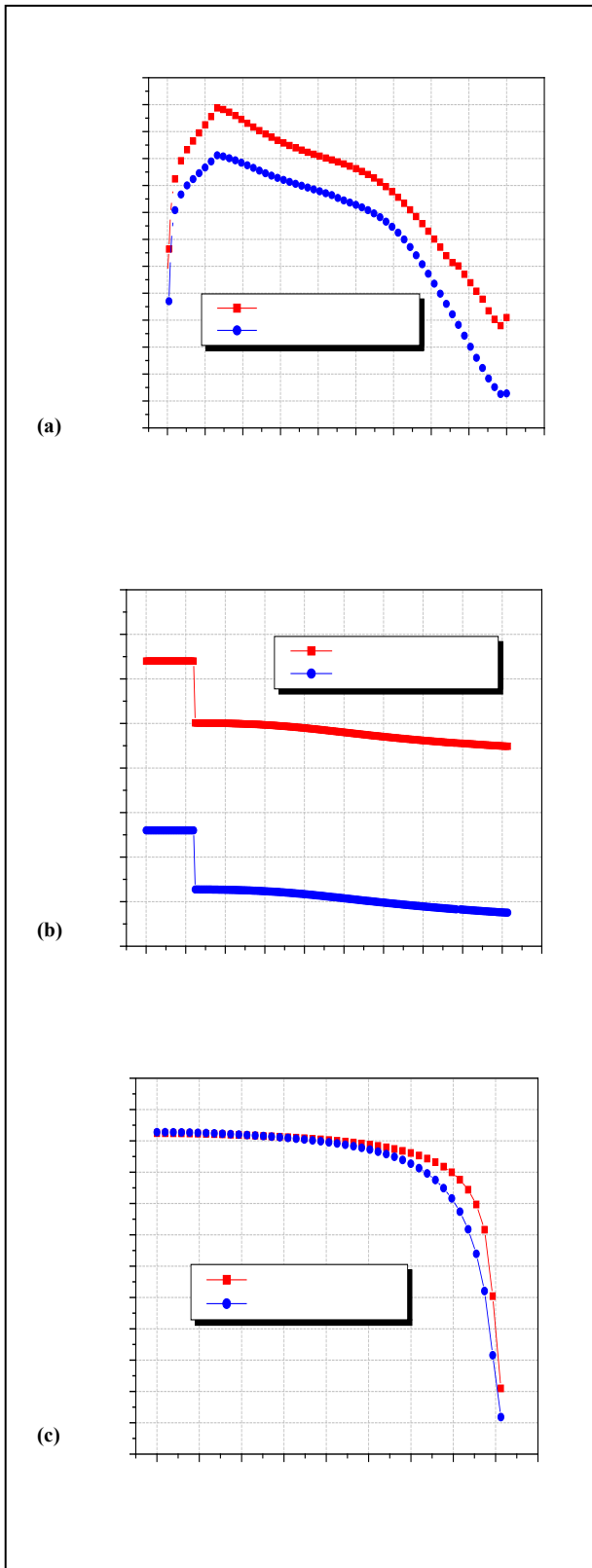


Figure 6. Profil de température en (K) à une vitesse de coulée $V_c = 1,8$ m/mn pour deux type d'acier ; (a) au niveau de la paroi du moule ; (b) au niveau de l'axe de symétrie du moule ; (c) au niveau de sortie du moule

Pour mettre en évidence le modèle $k-\varepsilon$, La figure 7(a et b) montre respectivement les contours du taux de dissipation et de l'énergie cinétique dans les deux formes

géométriques de la busette. On peut remarquer une diminution du phénomène turbulent pour la busette inclinée, ceci améliore relativement la structure de l'écoulement pour une meilleure décantation des particules.

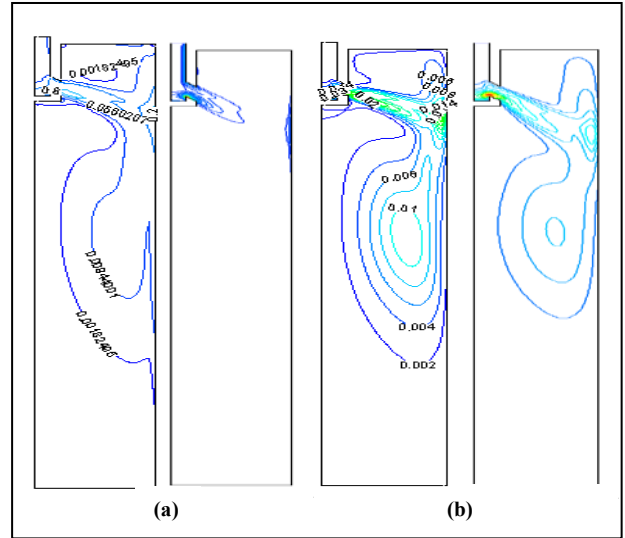


Figure 7. (a) Contour du taux de dissipation turbulent en (m^2/s^3), (b) Contour de l'énergie cinétique turbulente en (m^2/s^3) : à une vitesse de coulée 1,8 m/mn d'un acier inoxydable pour deux formes de busette

Sur les figure 8 et 9 sont présentées respectivement les valeurs du taux de dissipation et de l'énergie cinétique pour les deux cas de la busette. On remarque que l'amplitude maximale du taux de dissipation turbulent et de l'énergie cinétique est enregistrée à hauteur de 0.14 m à partir de la surface libre dans le cas d'une busette normale

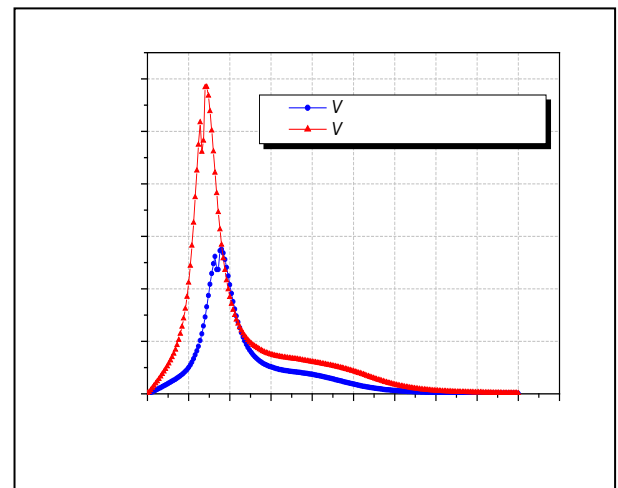


Figure 8. Taux de dissipation turbulent en (m^2/s^3) au niveau de la paroi du moule d'un acier inoxydable à une vitesse de coulée $V_c = 1,8$ m/mn pour deux formes de busette

L'impact du jet de la busette inclinée sur le taux de dissipation et l'énergie cinétique est induit par un décalage suivant la hauteur du moule d'environ 0.18 m et par une décroissance de l'amplitude.

Références

- [1] Brian G. Thomas, Quan Yuan, Bin Zhao, and S. Pratap Vanka, "Transient Fluid-Flow Phenomena in the Continuous Steel-Slab Casting Mold and Defect Formation" JOM
- [2] AF.Boudjabi, M.Lachi, N.Elwakil & A.Bellaouar, "Modélisation dynamique et thermique de l'écoulement diphasique dans un réacteur métallurgique de coulée continue" 2008
- [3] M.Janik, H.Dyja, S.Berski, G.Banaszek, "Two-dimensional thermomechanical analysis of continuous casting process", Journal of Materials Processing Technology 153-154 (2004) 578-582
- [4] A.Bellaouar, O.Kholai, P.Valentin, "Modélisation numérique du processus de refroidissement d'une brame d'acier inoxydable coulée en continu" 2005
- [5] M. BENSOUICI " Modélisation Numérique des écoulements dans un réacteur métallurgique à différents obstacles, université mentouri de constantine" 2007
- [6] N. Cheung , C.A. Santos , J.A. Spim b, A. Garcia "Application of a heuristic search technique for the improvement of spray zones cooling conditions in continuously cast steel billets".2005
- [7] Shavkat Kholmatov, "Mathematical Modeling of Particle Inclusion Removals during Continuous Casting of Steel". Master of Science Thesis-2005.
- [8] Carlos A. Santos, Jaime A. Spim Jr., Maria C.F. Ierardi, Amauri Garcia "The use of artificial intelligence technique for the optimisation of process parameters used in the continuous casting of steel".2001

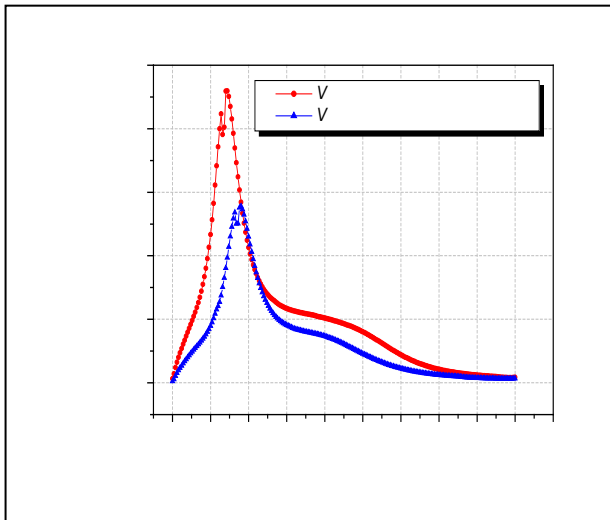


Figure 9. Energie cinétique turbulente en (m^2/s^3) au niveau de la paroi du moule d'un acier inoxydable à une vitesse de coulée $V_c = 1,8$ m/mn pour deux formes de busette

VII. CONCLUSION

Les résultats obtenus à travers cette étude ont permis de mettre en évidence l'influence positive de la géométrie de la busette sur la structure de l'écoulement et le champ de température sous l'influence de la vitesse de coulée dans le moule. Ainsi, la busette inclinée de 34° a permis d'allonger la trajectoire des particules non métalliques par un élargissement de la zone de recirculation. Ceci augmente la probabilité de décantation de ces particules vers la surface libre du moule. La formation de la croûte solidifiée est confirmée par le modèle numérique de prédiction du champ de température à la vitesse de coulée 1.8m/min. En perspective, une étude de comportement des inclusions sera envisagée.

NOMENCLATURE

C_p	Chaleur spécifique, J/Kg K
f_s	Fraction solidifiée
\dot{q}	Terme source, W/m ³
T	Température, K
Φ_s	Flux de la chaleur, W/m ²
K	Conductivité thermique, W/m.K
ρ	Masse volumique, Kg/m ³
T_l	Température de Liquidus, K
T_s	Température de Solidus, K
L	Chaleur latente de fusion, J/kg
ν	Viscosité dynamique, m ² /s
$H(T)$	Enthalpie, J/m ³
s	Surface de contact moule/brame, m ²
k_{in}	Énergie cinétique turbulente, m ² /s ²
\mathcal{E}_{in}	Taux de dissipation turbulent, m ² /s ³
V_c	Vitesse de coulée, m/mn