

III.3 Influence de la hauteur de la buse de pulvérisation

Cette partie a pour but l'investigation de l'effet de la hauteur de la buse sur les paramètres du refroidissement. Alors ; on a conservé la valeur optimale de la pression en effectuant des variations au niveau de la hauteur de la buse. Cette dernière a été placée à 100, 191, 330 mm et puis à 505 mm. En effet, l'éloignement de la buse a un effet significatif sur la température et l'énergie interne de la plaque (Fig. III.20 et 21).

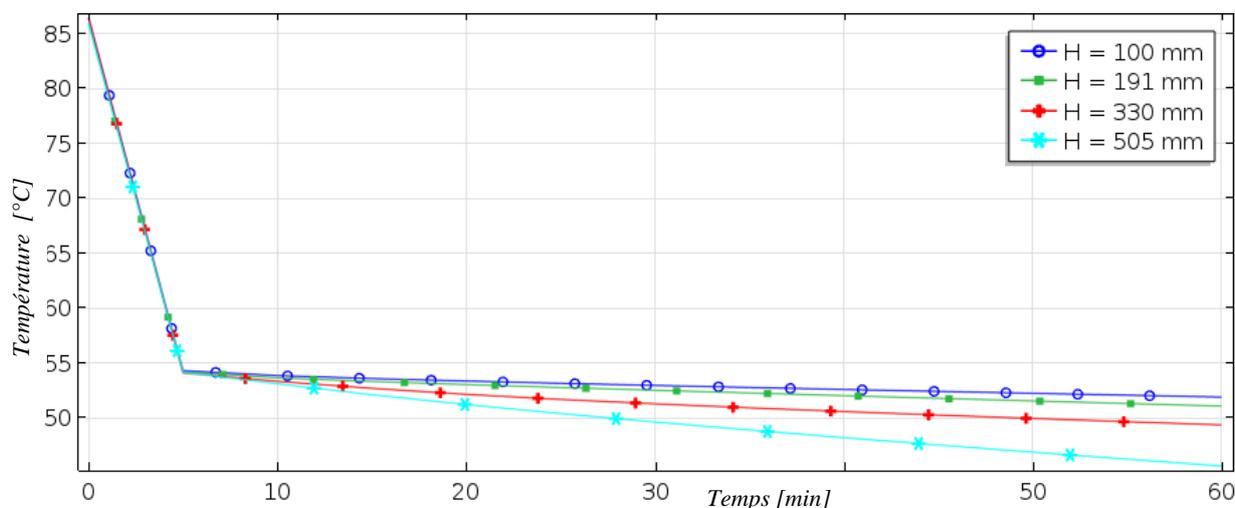


Fig. III.20 Influence de la hauteur de la buse sur la température de la plaque.

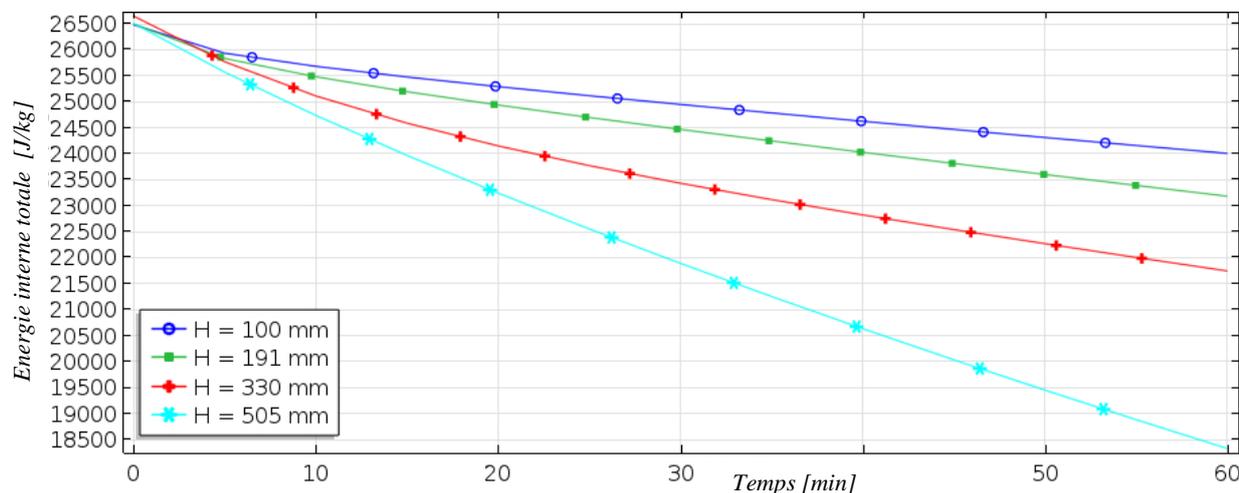


Fig. III.21 Energie interne totale de la plaque pour différentes hauteurs de buse.

Lorsque la buse est placée à une hauteur optimale, le spray peut couvrir une surface plus large (Fig. III.24). Effectivement, lorsque la buse est placée à 505 mm de la plaque, les températures obtenues sont plus basses que celles obtenues pour les autres hauteurs. Cependant ; si la hauteur de la buse dépasse une certaine limite, le refroidissement sera plus long et l'extraction de l'énergie

interne sera plus faible. En fait, lorsque la buse est trop loin de la plaque la dispersion maximale (g_{max}) du spray diminue [90].

L'effet de la hauteur apparaît également sur le flux de chaleur convectif (Fig. III.22), en effet, pour $H = 505$ mm, la surface importante couverte par le spray améliore le transfert de chaleur par convection. Évidemment, le flux de chaleur minimal est enregistré pour $H = 100$ mm. La figure III.23 montre la vitesse de pulvérisation mesurée à une hauteur de 27 mm au-dessus de la plaque. La vitesse des gouttes est d'autant plus grande que la hauteur diminue. Lorsque la buse est placée à la hauteur optimale, le spray peut couvrir une surface plus large, comme illustré par le traçage des particules représenté sur la figure III.24.

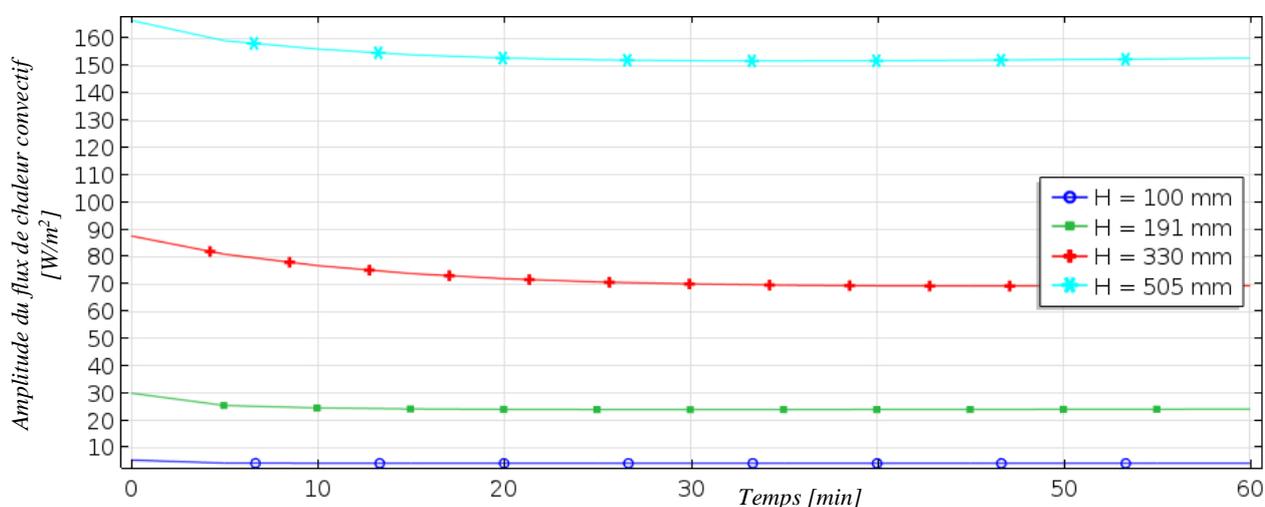


Fig. III.22 Variation du flux convectif au niveau de la région couverte par le spray.

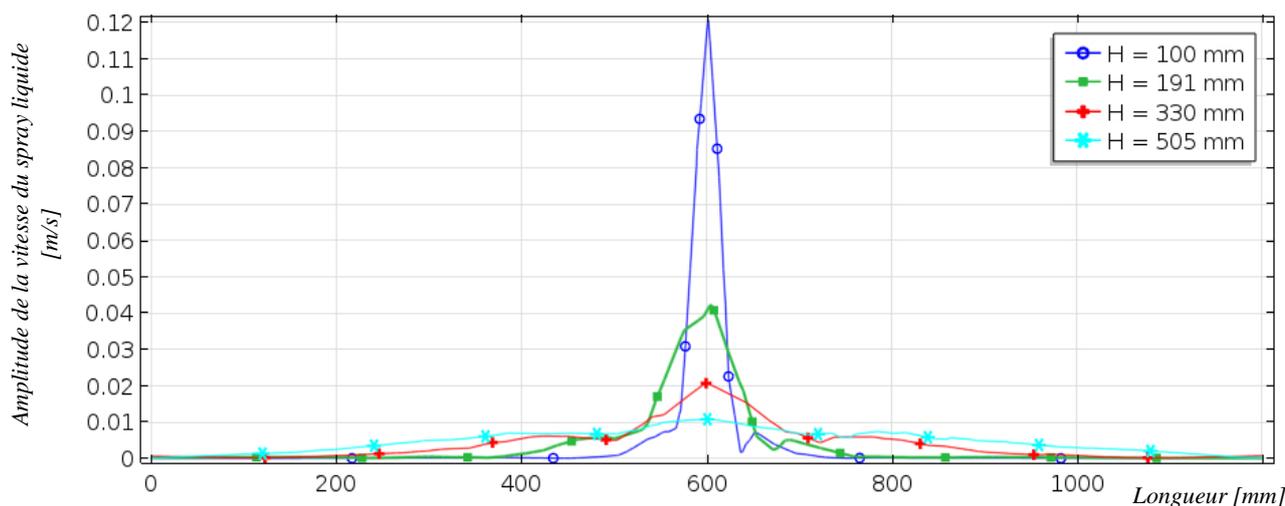


Fig. III.23 Vitesse du spray (à 27 mm au-dessus de la plaque) sous plusieurs hauteurs.

Une buse très proche de la plaque réduit considérablement la surface d'impact et peut affecter la surface du matériau étudié. Enfin, le choix de la hauteur idéale pour un refroidissement optimal repose sur une analyse objective des figures III.23 et III.24 qui nous aideront à trouver

Chapitre III Etude numérique sur l'effet des paramètres hydrodynamiques sur le refroidissement par pulvérisation monophasique

un compromis entre la vitesse des particules du jet et la surface couverte par les gouttelettes dispersées.

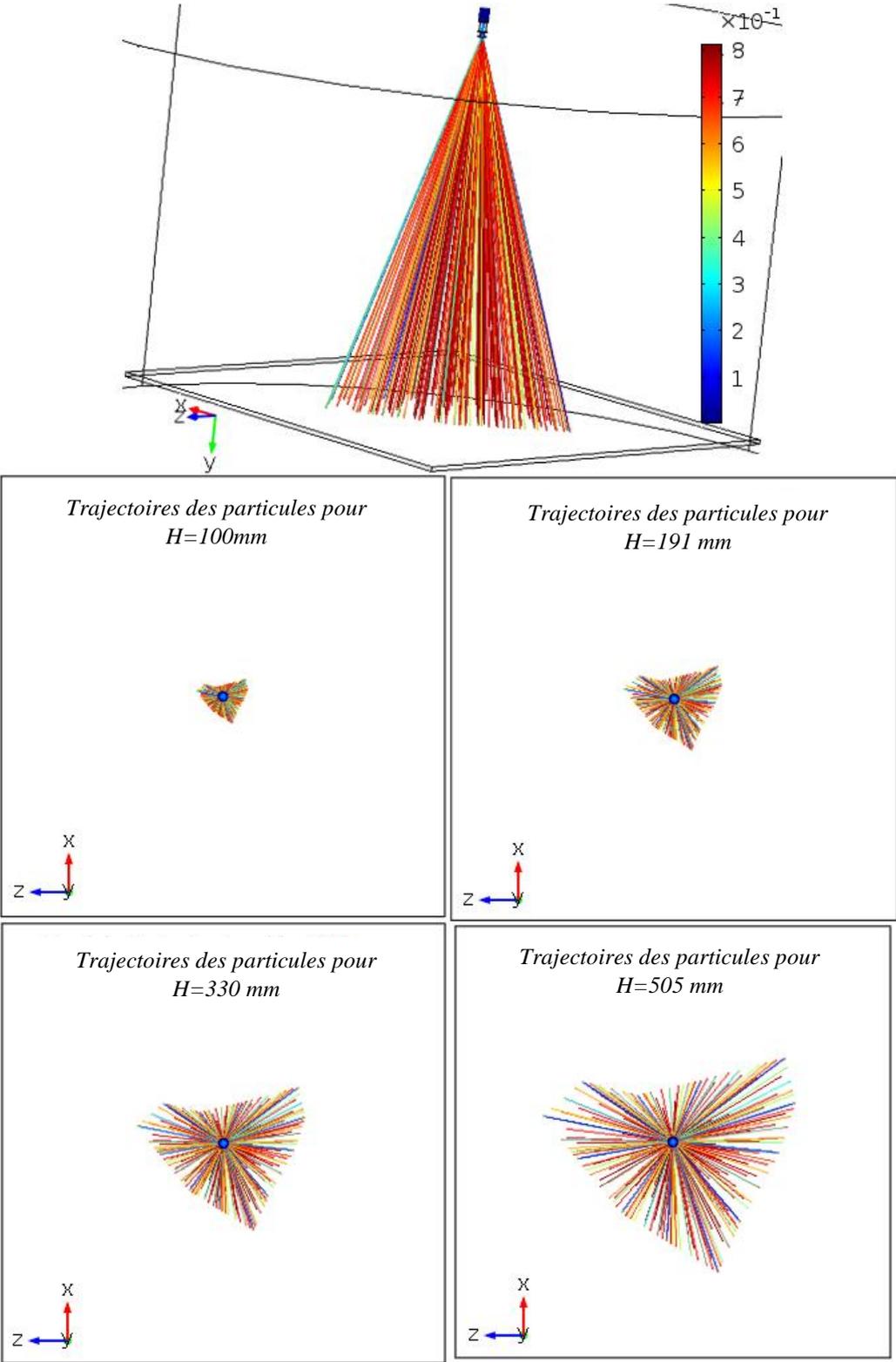


Fig. III.24 Distribution de 3000 particules du spray pour différente hauteurs.

Chapitre IV

*Simulation d'un procédé de coulée continue sous refroidissement secondaire
par pulvérisation*

I. Introduction

La fabrication de l'acier implique un certain nombre d'étapes afin de passer du minerai de fer brut ou de ferraille de recyclage, à de l'acier prêt à être utilisé dans différents secteurs industriels (la construction de bâtiments, la fabrication de voitures, ...). Le procédé le plus répandu qui permet de passer de l'acier liquide à un bloc d'acier solide, que l'on pourra ensuite travailler pour obtenir des tôles ou des poutres..., s'appelle la coulée continue. C'est cette étape de la fabrication de l'acier qui sert d'exemple d'application pour l'ensemble du travail présenté dans ce chapitre.

La coulée continue est un procédé de solidification du métal en fusion. Il consiste à remplir de métal liquide un moule violemment refroidi, puis à extraire lentement le produit du moule alors que celui-ci est dans certains cas, encore liquide à cœur. La solidification du métal liquide varie considérablement en fonction du mode de refroidissement établi.

La machine de coulée continue est composée d'un moule sans fond en cuivre appelé lingotière (repère numéro 3 sur la figure IV.1). Elle sert à solidifier l'acier à son contact ; ceci est appelé refroidissement primaire (Fig. IV.3). Pour cela, elle est parcourue par un réseau de canaux dans lesquels circule de l'eau afin de la refroidir en permanence. L'acier liquide est injecté par le haut de la lingotière par la busette (repère numéro 1).

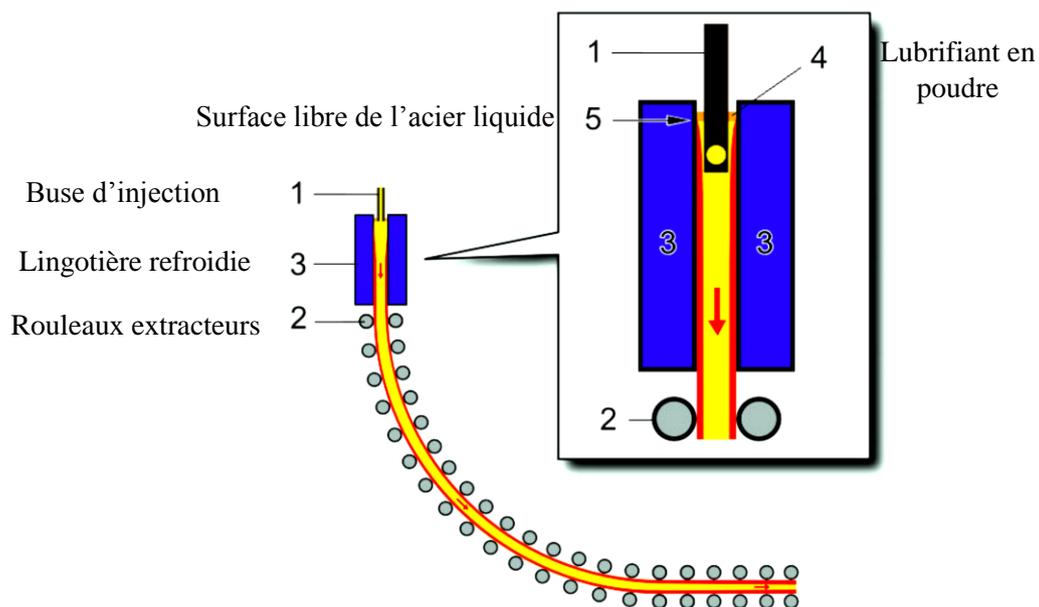


Fig. IV.1 Schéma de principe de la coulée continue [120].

Au contact de la paroi de la lingotière, la température de l'acier liquide diminue ce qui entraîne sa solidification. Cette solidification se propage donc de la paroi de la lingotière vers le cœur du produit, ainsi, l'épaisseur solide est proportionnelle au temps de séjour dans la lingotière. Par conséquent, comme l'acier avance dans la lingotière et que celle-ci est refroidie, l'épaisseur solidifiée est plus importante en bas qu'en haut de la lingotière. L'acier se trouvant au centre du produit reste liquide.

La partie d'acier solide qui enveloppe la partie liquide s'appelle la peau solide. Un ensemble de rouleaux dit "rouleaux extracteurs" (Fig. IV.1 : repère numéro 2) situé juste en dessous de la lingotière permet de guider et de tirer sur le produit partiellement solidifié par le bas de la lingotière pour l'extraire en continu. Un refroidissement par pulvérisation d'eau sur la surface de l'acier permet d'achever la solidification, ceci désigne le refroidissement secondaire (Fig. IV.3). L'extraction du produit peut continuer dans le sens vertical, comme elle peut être transféré par les rouleaux dans le sens horizontal (coulée horizontal – coulée courbé : Fig. IV.2). A l'extrémité de la machine, le produit est découpé en morceaux selon la taille voulue.

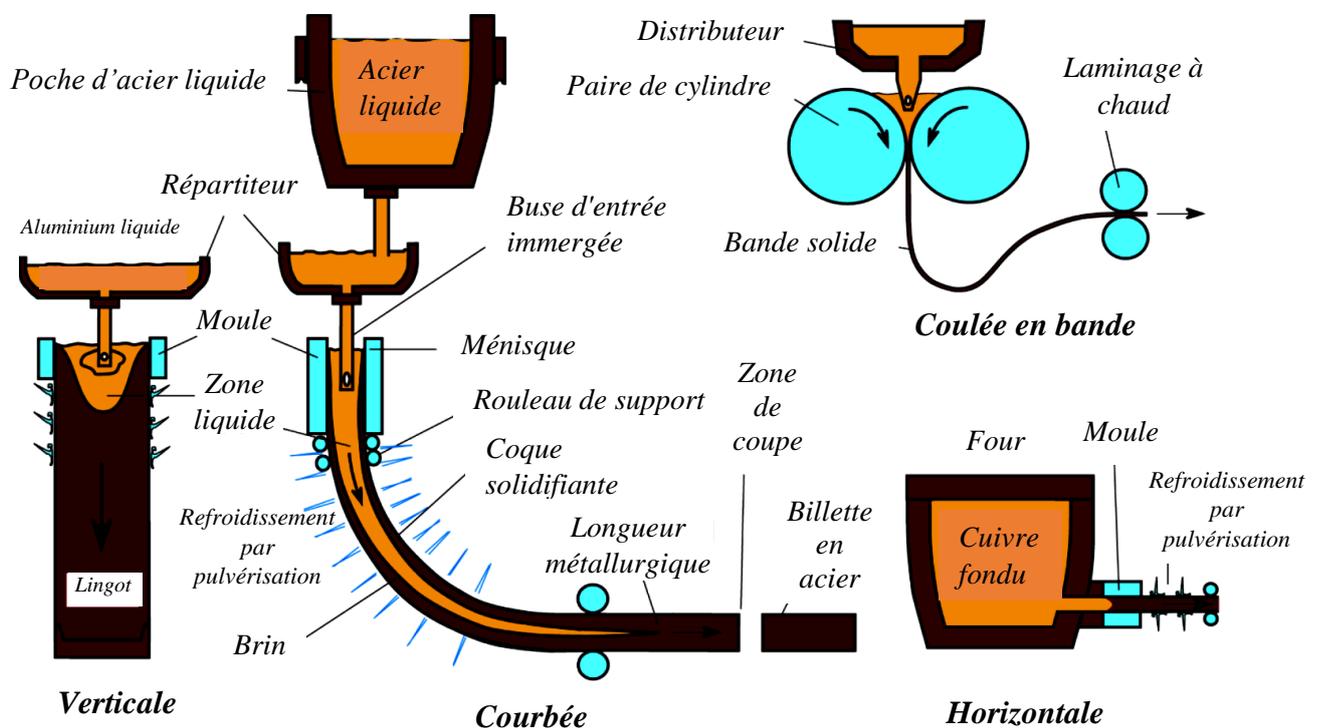


Fig. IV.2 Différents types de coulée continue [129].

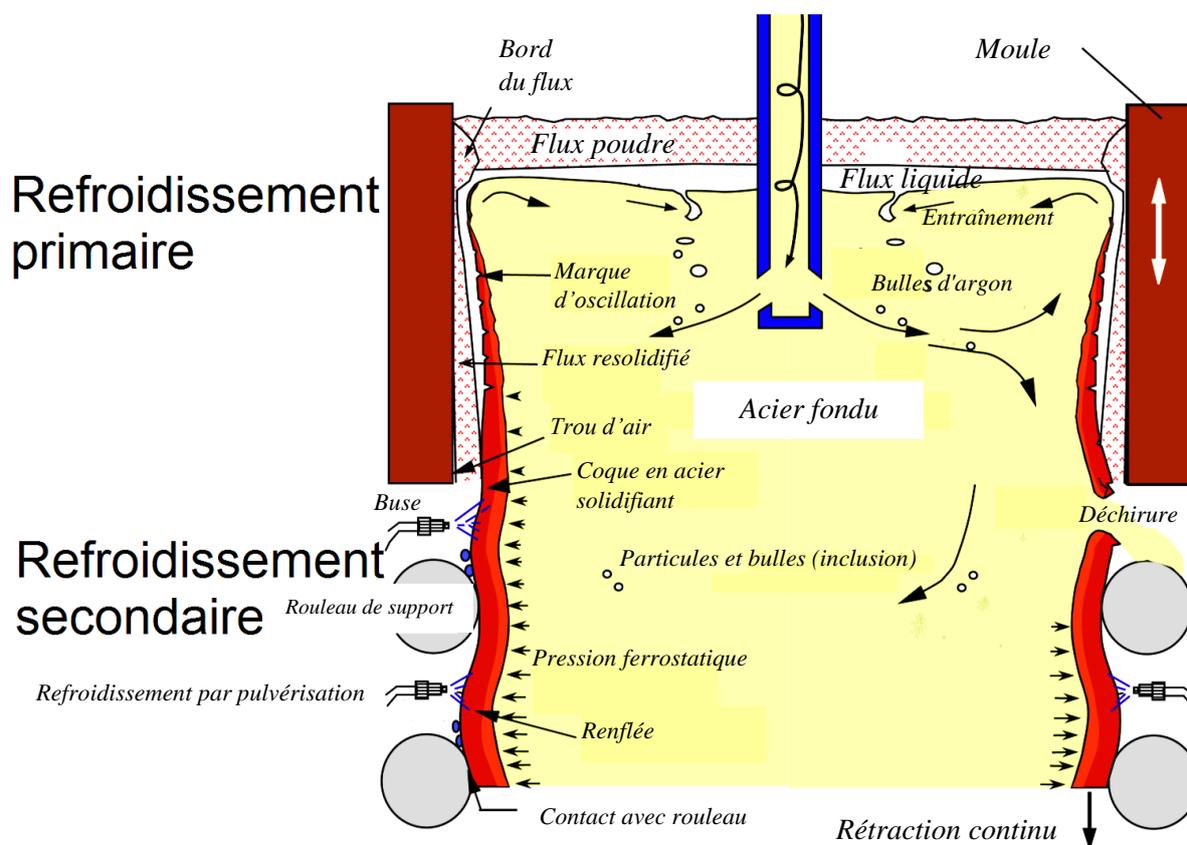


Fig. IV.3 Refroidissement primaire et secondaire lors de la coulée continue.

En premier lieu, l'objectif de cette étude est d'établir une comparaison entre trois modes de refroidissement pour déduire le mode adéquat pour un procédé de coulé continue. En second lieu, il vise à étudier l'influence du coefficient de transfert de chaleur du spray (h_{spray}) sur la transition du métal liquide en solide, sur la température de la zone refroidie par pulvérisation et sur la distribution de la chaleur latente de solidification. Le procédé de coulée continue a été simulé à l'aide du code COMSOL MULTIPHYSICS. A l'aide des résultats obtenus ; on a d'abord examiné l'efficacité du refroidissement par pulvérisation par rapport au refroidissement par convection naturelle ou forcée d'air. Ensuite on a déduit l'existence de trois relations importantes : la première relation montre que h_{spray} est inversement proportionnel à la température de la peau solide. La deuxième relation concerne la dissipation de la chaleur latente, celle-ci est aussi inversement proportionnel à h_{spray} . En fin, la troisième relation montre que l'intervalle de solidification et inversement proportionnel à h_{spray} . Finalement, on a conclu que le coefficient de transfert de chaleur h_{spray} a une influence remarquable sur l'emplacement de la région de transition.

II. Positionnement du problème

En coulée continue, le métal en fusion est coulé dans un moule ouvert pouvant être en graphite ou en cuivre. Les moules en graphite sont largement utilisés en coulée continue verticale et horizontale. Le métal est d'abord fondu dans un four et versé dans une poche. De la poche, le métal chaud est transféré dans le répartiteur. Le métal chaud est versé dans la machine de coulée continue à partir du répartiteur. Le moule dans le processus de coulée continue est refroidi à l'eau ; cela contribue à accélérer la solidification. Cependant cette dernière est achevée à l'extérieur du moule à l'aide d'un refroidissement secondaire par pulvérisation.

L'un des plus gros problèmes pouvant arriver au cours de la coulée continue est une percée ou déchirure "Breakout". La peau solide n'est pas suffisamment épaisse pour contenir l'acier liquide et se déchire, laissant ainsi l'acier s'écouler (Fig. IV.3). Ce problème est principalement dû à un refroidissement par pulvérisation, insuffisant. Il entraîne une grosse perte financière due aux dégâts causés et au temps perdu pour la remise en marche de l'installation. Donc le refroidissement secondaire doit être bien contrôlé et optimisé pour pouvoir maîtriser la solidification ce qui permet d'éviter les déchirures de métal et d'assurer également une zone de coupe adéquate. Pour ces objectifs un processus de coulée continue en régime permanent a été modélisé et simulé à l'aide du code commercial COMSOL MULTIPHYSICS 5.2 (Fig. IV.4).

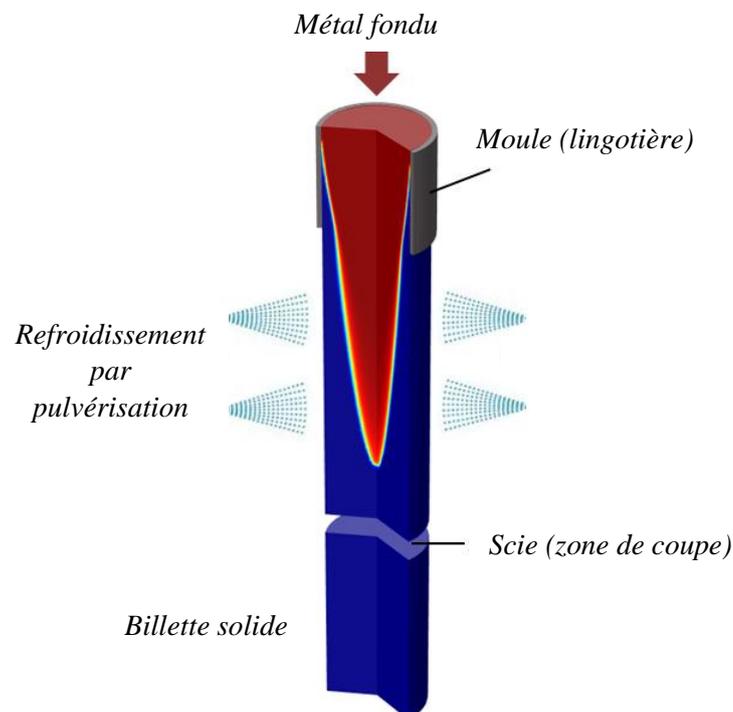


Fig. II4 Schématisation de la problématique.

III. Simulation de la coulée continue sous refroidissement secondaire par pulvérisation

III.1 Hypothèses de simulation

Pour simplifier le problème, le champ d'écoulement (*Flow Field*) du métal liquide n'est pas pris en considération, ainsi on suppose qu'il n'y a pas de changement de volume lors de la solidification. On suppose également que la vitesse de coulée est constante et uniforme dans tout le domaine, ayant une valeur de 2.5 mm/s. Dans cette étude, la géométrie 3D de la coulée continue est simplifiée en 2D axisymétrique composée de deux régions rectangulaires (Fig. IV.5) : l'une représente le métal dans le moule et l'autre représente la région refroidie par pulvérisation en dehors du moule. Dans la deuxième région s'effectue aussi un refroidissement par rayonnement. Dans cette région, on suppose que le métal fondu se trouve dans un état hydrostatique, et que le seul mouvement dans le fluide est dû au déplacement du métal vers le bas. Cette simplification permet la prise en charge du mouvement de la masse dans le domaine.

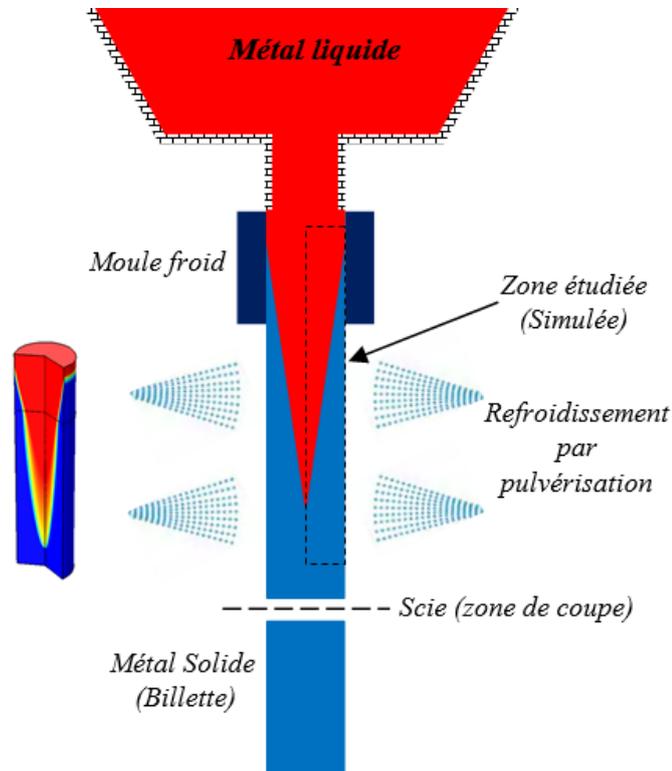


Fig. IV.5 Représentation de la zone de calcul.

Chapitre IV Simulation d'un procédé de coulée continue sous refroidissement secondaire par pulvérisation

Le matériau considéré est une fonte grise présentant les propriétés thermiques indiquées dans le tableau IV.1. Ce matériau est largement utilisé dans les domaines industriels et résidentiels ; Par conséquent, l'investigation de ses propriétés est très importante. Selon les différentes qualités, la fonte grise possède différents composants chimiques, cependant ; toutes les qualités de fonte grise ont la gamme de composants chimiques suivante :

Tableau IV.1 Propriétés chimiques de la fonte grise.

Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Phosphore (P)	Soufre (S)
2,8 à 3,9%	1,1 à 2,6%	0,5 à 1,2%	≤ 0,3%	≤ 0,15%

Tableau IV.2 Propriétés thermo physiques de la fonte grise.

Paramètre	Valeur
Chaleur latente de fusion	240×10^3 J/kg
Température de solidification T_s	1356 K
Température de fusion T_l	1463 K
Chaleur spécifique à T_s	660 J/(kg.K)
Chaleur spécifique à T_l	950 J/(kg.K)
Conductivité thermique à T_s	29 W/(m.K)
Conductivité thermique à T_l	26 W/(m.K)
Masse volumique à T_s	6964 kg/m ³
Masse volumique à T_l	6368 kg/m ³
Viscosité dynamique à T_l	0.0143 Pa.s

III.2 Formulation de la simulation

L'équation de conduction thermique qui décrit le transfert thermique du cas étudié s'écrit comme suite :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q \quad (\text{IV.1})$$

Équation dans laquelle u représente la vitesse de coulée et : $q = -k\nabla T$

En théorie, C_{p_s} est supposé constant en phase solide, mais en phase liquide, C_{p_l} est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$C_{p_l} = C_{p_s} + \frac{\Delta H}{T_m} \quad (\text{IV.2})$$

Dans l'équation ci-dessus, H représente la variation d'enthalpie et T_m la température de fusion. Ainsi, l'équation thermique en régime permanent du processus de coulée continue s'écrit simplement :

$$\rho C_p u \Delta T + \Delta(-k \Delta T) = 0 \quad (\text{IV.3})$$

La solidification du métal commence lorsque le métal liquide atteint la température de changement de phase (T_{pc}). Il est à noter que le changement de phase se produit dans un intervalle de température compris entre $T_{pc} - (DT/2)$ et $T_{pc} + (DT/2)$. Dans cet intervalle, la phase matérielle est modélisée par une fonction lissée θ représentant la fraction de phase avant la transition elle est égale à 1 avant $T_{pc} - (DT/2)$ et égale à zéro après $T_{pc} + (DT/2)$.

La densité et l'enthalpie spécifique sont respectivement :

$$\rho = \theta \rho_s + (1 - \theta) \rho_l \quad (\text{IV.4})$$

$$H = \frac{1}{\rho} \{ \theta \rho_s H_s + (1 - \theta) \rho_l H_l \} \quad (\text{IV.5})$$

Au cours de la transformation du liquide en solide, une quantité importante de chaleur latente est libérée. La quantité totale de chaleur libérée par unité de masse pendant la transition est donnée par la variation d'enthalpie DH . En plus, la chaleur spécifique varie avant, pendant et après la transition selon la formule :

$$\Delta C_p = \frac{\Delta H}{T} \quad (\text{IV.6})$$

Après quelques transformations formelles on obtient :

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_s C_{p,s} + \theta_2 \rho_l C_{p,l}) + \Delta H_f \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$$\alpha_m = \frac{(1 - \theta) \rho_l - \theta \rho_s}{2[\theta \rho_s + (1 - \theta) \rho_l]}$$

Il est égal à $-1/2$ avant transformation et $1/2$ après transformation. La capacité thermique spécifique est la somme d'une capacité thermique équivalente C_{eq} :

$$C_{eq} = \frac{1}{\rho} [\theta_1 \rho_s C_{p,s} + \theta_2 \rho_l C_{p,l}] \quad (\text{IV.8})$$

Et la distribution de la chaleur latente C_L :

$$C_L(T) = (H_l - H_s) \frac{d\alpha_m}{dt} \quad (\text{IV.9})$$

La distribution de la chaleur latente C_L est simplifiée :

$$C_L(T) = L \frac{d\alpha_m}{dt} \quad (\text{IV.10})$$

Alors que la chaleur totale par unité de volume libérée lors de la transformation de phase coïncide avec la chaleur latente :

$$\int_{T_{pc} - \frac{DT}{2}}^{T_{pc} + \frac{DT}{2}} C_L(T) dT = L \int_{T_{pc} - \frac{DT}{2}}^{T_{pc} + \frac{DT}{2}} \frac{d\alpha_m}{dt} dT = L \quad (\text{IV.11})$$

Enfin, la capacité thermique apparente, C_p , utilisée dans l'équation de chaleur, est donnée par:

$$C_p = \frac{1}{\rho} [\theta_1 \rho_s C_{p,s} + \theta_2 \rho_l C_{p,l}] + C_L \quad (\text{IV.12})$$

La conductivité thermique effective se réduit à :

$$K = \theta_1 K_s + \theta_2 K_l \quad (\text{IV.13})$$

La variation de la conductivité thermique permet l'obtention de l'expression :

$$k = \theta k_s + (1 - \theta)k_l \quad (\text{IV.14})$$

Au cours du refroidissement primaire, le flux de chaleur de convection transféré dans le moule par le métal liquide a été estimé à l'aide de l'équation de Newton :

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (\text{IV.15})$$

T_{ext} et T sont respectivement la température externe et de la paroi du moule.

h représente le coefficient de transfert de chaleur du moule ($h = 800 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

En ce qui concerne le refroidissement secondaire, la convection dans la zone de refroidissement par pulvérisation est calculée à l'aide de la même équation (Eq IV.15). Dans ce cas, T_{ext} et T sont respectivement la température externe et la température de l'acier ; h représente le coefficient de transfert de chaleur par pulvérisation. Comme mentionné précédemment, le rayonnement se produit pendant le processus de coulée continue. Il est décrit par l'équation de Stefan-Boltzmann dans laquelle la température T est exprimée en Kelvin :

$$q_0 = \varepsilon \sigma (T_{ext}^4 - T^4) \quad (\text{IV.6})$$

σ Est la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité thermique du métal. Dans notre model, $\varepsilon = 0,8$.

III.3 Simulation et analyse des résultats

III.3.1 Simulation de trois modes de refroidissement secondaire

Le premier model consiste à simuler un refroidissement secondaire par convection naturelle avec de l'air à pression atmosphérique et à une température de 27 °C [300 K]. Le résultat de la simulation de ce mode de refroidissement, illustrée à la figure IV.6 (a), montre la zone de transition qui dépasse le niveau de coupe. Donc, le risque d'obtenir un produit final solide à l'extérieur mais toujours liquide au cœur.

Le deuxième model consiste à simuler le refroidissement secondaire par convection forcée avec de l'air à une vitesse de 3 m/s à pression atmosphérique et une température de 20°C [293 K]. Le résultat obtenu sur la figure IV.6 (b) est similaire à la convection libre précédente ; Néanmoins, il existe une légère différence qui ne peut pas être observée à l'œil nu. Le troisième et dernier model est une simulation de refroidissement secondaire par pulvérisation d'eau. La figure IV.6 (c) illustre le résultat de ce mode de refroidissement. On peut distinguer une solidification complète du métal liquide avant d'atteindre la zone de coupe et ce qui permet également de minimiser les risques de déchirure du métal.

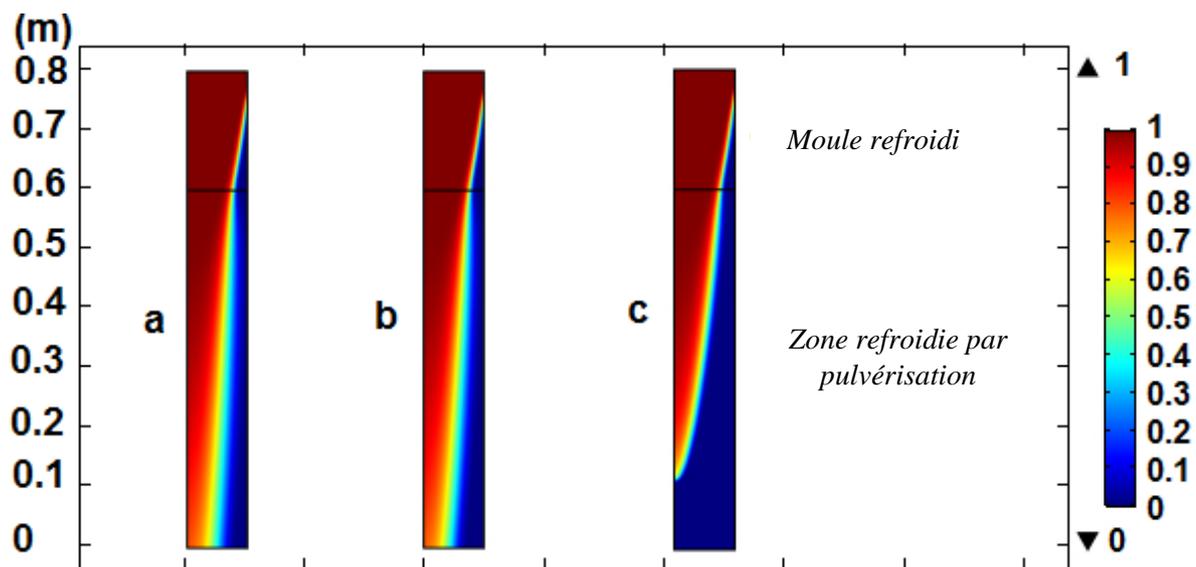


Fig. IV.6 Représentation de la transition de l'état liquide (1) à l'état solide (0) sous trois modes de refroidissement secondaire.

Des comparaisons plus convaincantes des trois modes de refroidissement décrits ci-dessus sont illustrées aux figures IV.7 et IV.8. En ce qui concerne la température dans la zone de refroidissement secondaire, (Fig. IV.7) elle varie de quelques degrés entre la convection naturelle et la convection forcée. La température minimale enregistrée pour ces deux modes de refroidissement est d'environ 1318 K, ce qui reste supérieur à la valeur requise pour une solidification complète. Cette analyse est confirmée par la figure IV.8 montrant l'évolution du passage de l'état liquide à l'état solide.

Les valeurs de transition sont prises sur l'axe de symétrie pour un intervalle de mesure de 0 à 0.6 m. Pour le refroidissement par convection, la solidification du métal n'atteint que 20%, alors que l'objectif est d'atteindre 0% de liquide à $L = 0$ m. Par ailleurs, comme on peut le voir à travers les graphiques (Fig. IV.7& IV.8), le refroidissement par pulvérisation permet une solidification complète (0% liquide) à partir du point $L = 0,1$ m. Ceci est dû à une chute de température relativement importante. En fait, une température de $T = 1186$ K est enregistrée au point $L = 0$ m.

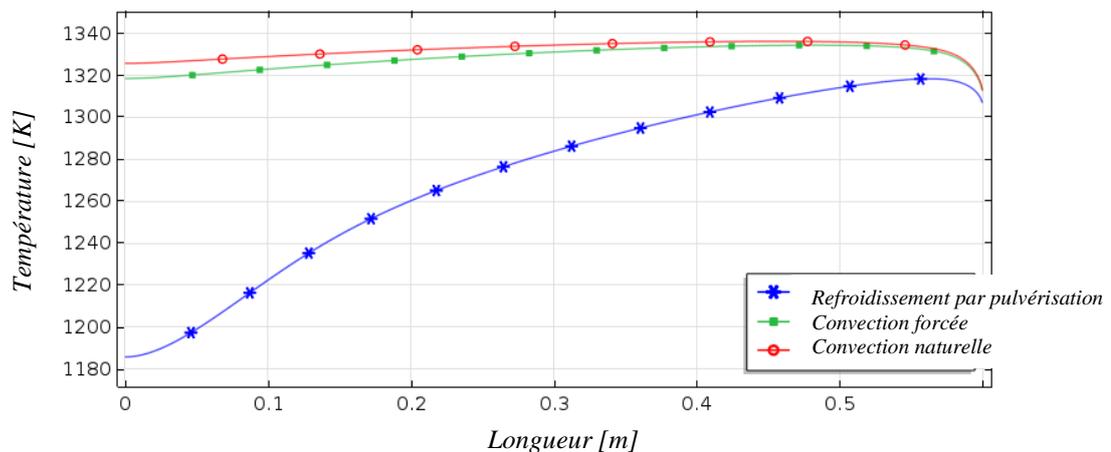


Fig. IV.7 Résultat de la température au niveau de la surface refroidie par les trois modes de refroidissement secondaire.

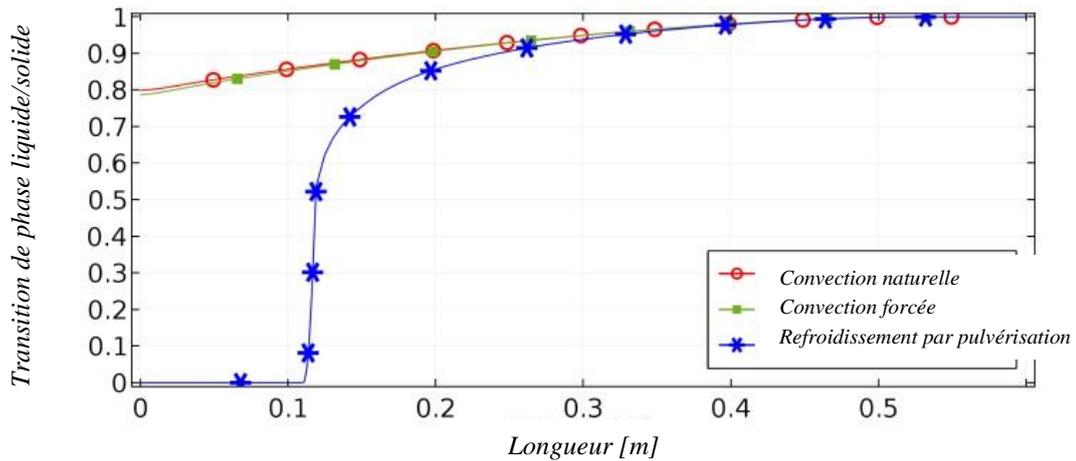


Fig. IV.8 Transition de l'état liquide à l'état solide sous les trois modes de refroidissement.

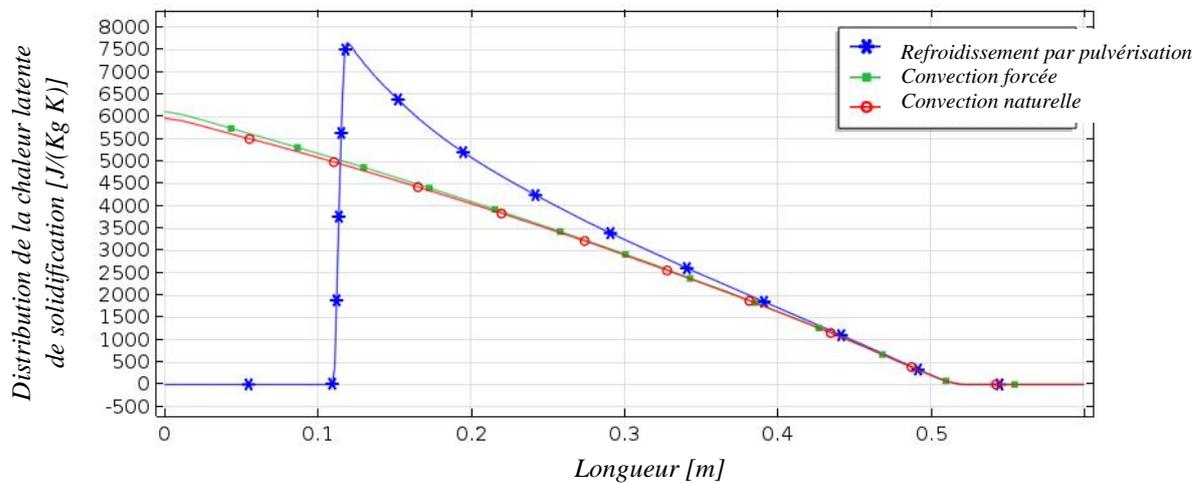


Fig. IV.9 distributions de la chaleur latente de solidification (au niveau de l'axe de symétrie) pour les trois modes de refroidissement.

Evidemment, la température de la paroi (zone refroidie) a une influence directe sur la solidification du métal liquide. Cette température et l'intervalle de dissipation de la chaleur latente de solidification sont relativement liés, et cela est clairement visible sur les figures IV.9 et IV.7. Il est à noter que, lorsque la température de la paroi extérieure est élevée, la chaleur latente dégagée est faible, inférieure à 5 000 J / (kg.K).

En conclusion, le processus de refroidissement par pulvérisation est indispensable pour la coulée continue. En effet il accélère le processus par une grande quantité d'évacuation de la chaleur sans gaspillage d'eau, ce qui implique un gain de temps et d'énergie.