III.3.2 Effet du coefficient de transfert de chaleur du spray sur le refroidissement secondaire

L'efficacité du refroidissement par pulvérisation étant établie en vue d'une optimisation paramétrique de ce type de refroidissement lors du processus de coulée continue. Nous étudions dans cette partie l'influence du coefficient de transfert de chaleur (h_{spray}) sur la vitesse de refroidissement du métal. Les résultats obtenus précédemment montrent très significativement l'efficacité du refroidissement par pulvérisation d'eau. En effet, l'augmentation de h_{spray} accélère le transfert de chaleur. Si nous considérons le niveau L = 0,3 m, la température de la paroi chute à 35%, ce qui correspond à une valeur h_{spray} de 1500 W/(m^2 .K). Si la valeur h_{spray} est supérieure, de l'ordre de 6000 W/(m^2 .K), la diminution de la température de la paroi est de 70%.



Fig. IV.10 Effet du coefficient de transfert de chaleur (h_{spray}) sur la température de la paroi extérieure lors du refroidie par pulvérisation.

Effectivement, La solidification est plus rapide avec des coefficients de transfert de chaleur plus élevés, par exemple pour $h_{spray} = 6000 W / (m^2.K)$. La solidification commence à L = 0.5615 m et se termine à L = 0.537 m, tandis que pour $h_{spray} = 1500 W / (m^2.K)$ le processus commence au niveau L = 0,532 m et se termine à L = 0,451 m (Fig. IV.12).

En outre ; plus on diminue la valeur de h_{spray} , plus la température de la paroi extérieure augmente (Fig. IV.10). Pour cette raison l'intervalle de dissipation de la chaleur latente augmente jusqu'à ce qu'il dépasse 0.5 m (Fig. IV.11). Donc l'intervalle de solidification est inversement proportionnel au coefficient de transfert de chaleur h_{spray} . Ce qui fait que ; ce dernier à une influence remarquable sur l'emplacement de la région de transition (Fig. IV.13).

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



Fig. IV.11 Effet du coefficient de transfert de chaleur (h_{spray}) sur la distribution de la chaleur latente de solidification.



Fig. IV.12 Effet du coefficient de transfert de chaleur (h_{spray}) sur la transition du liquide (1) en solide (0).

Cette étude prend en compte l'évolution de la chaleur latente et permet de déterminer son effet sur le taux de solidification, qui a implicitement une influence remarquable sur l'emplacement de la région de transition. Il est clair que l'intervalle de solidification est inversement proportionnel au coefficient de transfert de chaleur (h_{spray}). Ce qui fait que ; ce dernier à une influence remarquable sur l'emplacement de la région de transition (Fig. IV.13).



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

Fig. IV.13 Effet du coefficient de transfert de chaleur (h_{spray}) sur l'emplacement de la zone de transition.

Chapitre V

Conclusions et perspectives

I. Conclusions

- En premier lieu, cette thèse traite l'influence des paramètres hydrodynamiques de pulvérisation sur le comportement thermodynamique et thermique d'une plaque d'aluminium à une température de 92°C. Contrairement aux études précédentes de la littérature consacrées uniquement au refroidissement intensif de surfaces à haute température, la présente thèse permet d'observer l'évolution des paramètres hydrodynamiques et thermiques lors du refroidissement de surface par spray d'eau à une température inférieure à la température de saturation du fluide de refroidissement. Les principales conclusions de cette partie sont :
 - Lors d'un refroidissement par pulvérisation sans changement de phase, l'augmentation du débit entraine une meilleure évacuation de chaleur ainsi qu'une meilleure diminution d'énergie interne. Ce qui n'est pas le cas pour un refroidissement bi-phasique [130].
 - L'augmentation de la pression d'entrée du liquide de refroidissement, provoque une diminution rapide de la température et de l'énergie interne du corps à refroidir. Il y a aussi une influence considérable sur le flux convectif évacué vers l'air ambiant. Donc ; la variation de la pression réagit de la même manière que lors d'un refroidissement avec changement de phase [131].
 - Dans le cas d'un refroidissement monophasique, l'éloignement de la buse de pulvérisation améliore le refroidissement. 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 effet ; ce comportement est exactement le même pour un refroidissement avec changement de phase [130].

L'étude précédente est valable pour plusieurs applications tel que le refroidissement des panneaux photovoltaïques. Etant donné que l'augmentation du rendement électrique dépend principalement des techniques de refroidissement. Il est évident qu'une diminution de la température du panneau photovoltaïque entraîne une augmentation du rendement électrique. En outre, les températures élevées réduisent la durée de vie du système PV. Pour augmenter l'efficacité moyenne des panneaux PV conventionnels, il est nécessaire d'avoir une dissipation thermique plus efficace. En effet, la face arrière des panneaux PV est généralement en aluminium. A cet égard, les résultats de cette étude peuvent contribuer à l'amélioration du refroidissement par pulvérisation des panneaux photovoltaïques.

En second lieu, trois modes de refroidissement d'un procédé de coulée continue ont été étudiés dans cette thèse. On a d'abord appliqué un refroidissement par convection naturelle et puis par convection forcée avec de l'air ambiant. Dans les deux cas, la solidification du métal liquide dépasse la zone de coupe. Donc le refroidissement secondaire par pulvérisation est indispensable pour les procédés de coulée continue. Effectivement, on a obtenu une solidification complète juste après 0,5 m de la sortie du moule avec un refroidissement secondaire par pulvérisation est le mode le plus optimal pour le refroidissement secondaire de coulée continue.

Les résultats obtenus montrent clairement que la température de la paroi extérieure a une influence sur la solidification du métal liquide. Ceci nous a permet de déduire une relation entre la température et l'intervalle de dissipation de la chaleur latente de solidification (plus la température est faible, plus la dissipation de la chaleur latente de solidification est importante). Il découle alors une relation inversement proportionnelle entre la température est la dissipation de la chaleur latente de solidification de la dissipation de la chaleur latente de solidification de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation de la chaleur latente que l'augmentation de la dissipation engendre une diminution de l'intervalle de solidification.

Par ailleurs, le coefficient de transfert de chaleur du Spray ($h_{_spray}$) a été examiné. En effet, il a été constaté que l'augmentation de ce coefficient provoque une chute importante de température au niveau de la peau solide. Cette chute favorise la dissipation de la chaleur latente de solidification. Donc, cette dernière est proportionnelle à $h_{_spray}$.

Les relations déduites sont les suivantes :

- Une relation inversement proportionnelle entre h_spray et la température de la paroi extérieure (peau solide) : ↑ h_spray → ↓ T ;
- Une relation inversement proportionnelle entre la température de la paroi extérieure et la dissipation de la chaleur latente de solidification : ↓ T → ↑ *dissipation ;*
- Une relation inversement proportionnelle entre la dissipation de la chaleur latente de solidification et l'intervalle de solidification du métal liquide : ↑ dissipation → []_{de solidification}.

Les relations relatifs précédentes sont résumé comme suite :

 $\uparrow h_{-spray} \Rightarrow \downarrow T \Rightarrow \uparrow$ dissipatio $n \Rightarrow \downarrow []_{de . solidifica tion}$

II. Perspectives

L'influence des paramètres hydrodynamiques sur le refroidissement des hautes températures par pulvérisation, n'a pas été traitée dans cette thèse. A ce propos, une étude numérique validée expérimentalement va être réalisée pour la conception d'un système de refroidissement par pulvérisation, destiné au cylindre de laminage à pas de pèlerin. Car le système de refroidissement (par jet d'eau) actuel a montré plusieurs défaillances. Tel que les brulures et les fissures qui ont un impact direct sur la qualité du produit laminé et aussi la cadence et la productivité de l'entreprise. Donc la conception d'un nouveau système de refroidissement est indispensable pour la prévention et la résolution de plusieurs problèmes. L'entreprise concernée est la deuxième *tuberie sans soudure* en Afrique, situé au complexe sidérurgique El-Hadjar, Annaba.

La conception de ce système de refroidissement par pulvérisation nécessite l'optimisation de plusieurs paramètres hydrodynamiques :

- La distance entre les buses de pulvérisation et le cylindre ;
- L'angle d'inclinaison des buses ;
- Le type de buse ;
- L'angle de pulvérisation ;
- Le nombre de buse ;
- La distance de séparation entre les buses ;
- Le diamètre et le design du tube d'alimentation.

> Publications internationales

- A. Otmani, H. Mzad, K. Bey ; A thermal parametric study of non-evaporative spray cooling process ; MATEC Web of Conferences 240, 01030
- A. Otmani, H. Mzad ; PARAMETRIC STUDY OF NON-EVAPORATIVE SPRAY COOLING ON ALUMINUM PLATE: Simulation and Analysis; THERMAL SCIENCE, Vol. 23, pp: S1393-S1402, ISSN 2334-7163
- H. Mzad, A. Otmani, K. Bey, S. Łopata; A model of water-spray cooling effect on a continuous casting process; MATEC Web of Conferences 240, 04006
- H. Mzad, A. Otmani, A. Haouam, S. Łopata, P. Ocłoń; Tilt optimization of a doubleglazed air solar collector prototype ; MATEC Web of Conferences 240, 04006
- H. Mzad, A. Otmani; THERMAL SIMULATION OF A CONTINUOUS CASTING PROCESS SUBJECTED TO WATER-SPRAYS COOLING; Archives of Thermodynamics, AOT-00167-2018-02

Communications internationales

- Influences des paramètres hydrodynamiques sur le refroidissement par pulvérisation ; 3 éme Conférence internationale de mécanique ; Annaba 2017.
- Investigation thermique sur le four de trempe d'Arcelor Mittal pipe et tube Algérie ; International seminar on the apport of the simulation in technological innovation (S.I.A.S.I.T'17) Ghardaia 2017.
- A thermal parametric study of non-evaporative spray cooling process; XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer; Cracow, Poland 2018

Communications nationales

- Problème des pertes énergétique d'un four de traitement thermique, solution proposes ; Congrès annuel sur les sciences et technologies appliquées CASTA'16 ; Boumerdes 2016
- Evaluation des pertes énergétique d'un four de traitement thermique et leurs influences sur l'environnement ; Journées d'études sur la fonderie et l'environnement JEFE'2016 ; Annaba 2016

- [1] N. Sandro, «Water spray cooling technique applied on a,» *Energy Conversion and Management*, 2016.
- [2] A. S. WILLIAM, Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays, University of California Irvine: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1999.
- [3] R. J. Schick, General Guidelines on Drop Size Measurement Techniques and Terminology, Wheaton, IL 60187 USA: Spray Analysis and Research Services, 1997.
- [4] S. Kooij, R. Sijs, M. M. Denn, E. Villermaux et D. Bonn, «What Determines the Drop Size in Sprays?,» PHYSICAL REVIEW, vol. 8, 2018.
- [5] R. Schick, Understanding Drop Size, Wheaton USA: Spraying Systems Co., 2008.
- [6] M.-G. Eduardo, «Effect of the spray cone angle in the spray cooling with R134a,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 50, p. 127–138, 2013.
- [7] L. F. Pierre, Thermal Spray Fundamentals, New York: Springer Science+Business Media, 2014.
- [8] W.-L. Cheng, «Spray characteristics and spray cooling heat transfer in the non-boiling regime,» *ELSEVIER Energy*, vol. 36, pp. 3399-3405, 2011.
- [9] H. L. Arthur et G. Vincent, Atomization and Sprays, New York, N.Y. : 1989: CRC Press, 1989.
- [10] L. Rayleigh, «The Instability Of Jets,» F.R.S., vol. 10, pp. 4-13, 1879.
- [11] C. Weber, «For the decay of a liquid jet,» 1931.
- [12] R. Reitz, «Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays,» Atomization and Sprays, vol. 3, pp. 309-337, 1987.
- [13] G. Faeth et L. P. Hsiang, «drop properties after secondary breakup,» Int. J. of Multiphase, pp. 721-735, 1993.
- [14] W. H. Chou et e. all, «Temporal properties of secondary drop,» Int. J. of Multiphase Flow, 1997.
- [15] G. Faeth et G. Chou, «Temporal properties of secondary drop breakup in the bag,» Int. J. of Multiphase Flow, 1998.
- [16] Z. Dai et G. Faeth, «Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode,» Int. J. of Multiphase Flow, 2001.
- [17] Z. Rui et C. Wen-long, «Study on heat transfer performance of spray cooling model and analysis,» *Springer Verlag*, vol. 46, p. 821–829, 2010.
- [18] X. Jiang et G. Siamas, «Physical modelling and advanced simulations of gas–liquid two-phase jet flows in atomization and sprays,» *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010.
- [19] S. Gant, «CFD Modelling of Water Spray Barriers,» Health and Safety Laboratory, 2006.

- [20] P. Jenny, D. Roekaerts et N. Beishuizen, «Modeling of turbulent dilute spray combustion,» Progress in Energy and Combustion Science, vol. 38, pp. 846-887, 2012.
- [21] G. Gouesbet et A. Berlemont, «Eulerian and Lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows Progress in Energy and Combustion,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 25, pp. 133-159, 1999.
- [22] S. Apte et M. Gorokhovoski, «LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup,» *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 29, pp. 1503-1522, 2003.
- [23] B. Launder et D. Spalding, «Lectures in Mathematical Models of Turbulence,» *Academic Press London*, 1972.
- [24] D. Choudhury, « Introduction of the renormilization group method and turbulence modeling,» 1993.
- [25] S. A. Orszag, «Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations,» chez *International Conference on Near-Wall Turbulent Flows*, Arizona, 1993.
- [26] V. Yakhot et S. Orszag, «Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique,» *Physic of Fluids*, pp. 1510-1520, 1992.
- [27] T. H. Shih, W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang et J. Zhu, «A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation,» *Computers Fluids*, pp. 227-238, 1995.
- [28] F. Menter, «Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows,» AIAA Journal, 1993.
- [29] M. Maxey et J. Riley, «Equation of motion for a small rigid sphere in a non-uniform flow,» *Physic of Fluids*, vol. 26, pp. 883-889, 1983.
- [30] R. Gatignol, «The Faxen formulae for a rigid particle in an unsteady non-uniform flow,» *J. Meca. Théor. et Appliquée*, vol. 1, pp. 143-160, 1983.
- [31] L. Schiller et A. Nauman, «A drag coefficient correlation,» V.D.I. Zeitung, vol. 77, pp. 318-320, 1935.
- [32] S. Morsi et A. Alexander, «An investigation of particle trajectories in two-phase flow system,» *J. Fluid Mech.*, vol. 55, pp. 193-208, 1972.
- [33] V. Rivkind, G. Ryskin et G. Fishbein, «Flow around a spherical drop at intermediate Reynolds numbers,» Appl. Math. Mech., vol. 40, pp. 687-691, 1976.
- [34] B. Oesterlé, «Multiphasiques, Ecoulements» Hermes Science.
- [35] A. B. Liu, D. Mather et R. D. Reitz, «Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays,» SAE Technical Paper,, 1993.
- [36] E. E. Michaelides, «Review-The transient Equation of Motion for Particles, Bubbles and Droplets,» J. Fluids Engin, 1997.

- [37] A. Rourke et A. Amsden, «The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup ;,» *SAE Technical Paper*, 1987.
- [38] E. Ibrahim, H. Yang et A. Prezelwas, «Modeling of spray Droplets Deformation and Breakup,» *AIAA Journal*, vol. 9, pp. 651-654, 1993.
- [39] F. X. Tanner, «A Cascade Atomization and Drop Breakup Model for the Simulation of High-Pressure Liquid Jets,» *SAE Technical Paper*, 2003.
- [40] F. X. Tanner, «Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays,» SAE Technical Paper, 1997.
- [41] M. Gorokhovski et V. Saveliev, «Analyses of Kolmogorov's model of breakup and its Analyses of Kolmogorov's model of breakup and its,» *Atomization and Sprays*, pp. 184-192, 2003.
- [42] H. Lamb, Hydrodynamics, Dover Publications, Sixth Edition.
- [43] G. Č. Filip et N. Sandro, «Analysis of influence of panel size on PV panel,» chez International Conference on Hydrogen Production, 2016.
- [44] M. C. R. ALMEIDA, N. CANEY et J.-A. GRUSS, «Étude du spray comme technologie de refroidissement diphasique».
- [45] V. Stéphane et M. Jean-Claude, «Le refroidissement par pulvérisation Cooling hy atomization,» *LA HOUILLE BLANCHE*, vol. 6, pp. 367-375, 1979.
- [46] B. Glassman, «A Fluid Management System for a Multiple Nozzle Array Spray Cooler,» chez *37th AIAA Thermo-physics Conference*, Portland, 2005.
- [47] Z. Yan et e. all, «Spray Cooling,» 2011.
- [48] W. Cheng, F. Han, Q. Liu, H. Fan, «Spray characteristics and spray cooling heat transfer in the non-boiling regime,» *Energy*, vol. 36, p. 3399e3405, 2011.
- [49] S. C. Johnathan, enhancement of spray cooling heat transfer using extended surfaces and nanofluids, PhD thesis, 2007.
- [50] J. Huddle, «Thermal management of Diode laser arrays,» chez 16th IEEE SEMI-THERMTM Symposium, 2000.
- [51] S. M. Sellers, «Heat transfer resulting from the evaporation of liquid droplets on a horizontal heated surface,» Georgia Institute of Technology, 2000.
- [52] S. Tan, Computer simulation of a spray cooling system with FC-72, Central Florida: Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering, 2001.
- [53] R. Selvam, «Computer Modeling of Liquid Droplet Impact on Heat Transfer During Spray Cooling,» *American Society of Mechanical Engineers Paper*, 2005.
- [54] M. Pais et et all, «Surface roughness and its effect on the heat transfer mechanism in spray cooling,» *Journal of Heat Transfer*, vol. 114, p. 211–219, 1992.

- [55] J. Sigler et R. Mesler, «The behavior of the gas film formed upon drop impact with a liquid surface,» *International Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 134, pp. 459-474, 1990.
- [56] J. Yang, «Spray cooling with an air atomizing nozzle,,» *Ph.D. dissertation School of Mechanical Engineering, University of Kentucky*, 1993.
- [57] B. Horacek, J. Kim et K. Kiger, «Spray cooling using multiple nozzles: visualization and wall heat transfer measurements.,» *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 4, p. 614–625, 2004.
- [58] M. Quentin, Etude expérimentale des mécanismes d'évaporation d'un film liquide combustible et de la stratification induite, L'UNIVERSITE DE LYON: THESE de DOCTORAT DE , 2018.
- [59] E. Silk, E. Golliher et R. Selvam, «Spray cooling heat transfer: Technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application.,» *Energy Conversion*, vol. 49, pp. 453-468, 2008.
- [60] Nevedo J., Parametric effects of spray characteristics on spray cooling heat transfer, Ph.D. Dissertation, 2000.
- [61] A. Pautsch, «Spray impingement cooling with single- and multi-nozzle arrays Part 1: Heat transfer data using FC-72.,» *International Journal of Heat and Mass*, vol. 48, pp. 3167-3175, 2005.
- [62] V. Carey, «Liquid-vapour phase-change phenomena,» Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [63] M. Sehmbey, M. Pais et L. Chow, «Effect of surface material properties and surface characteristics in evaporative spray cooling,» chez AIAA/ASME 5th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1990.
- [64] I. Mudawar, «Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface.,» Journal of Heat Transfer, vol. 118, p. 672–679, 1996.
- [65] L. Esmailizadeh et R. Mesler, « Bubble entrainment with drops,,» *Journal of Colloid and Interface*, vol. 86, pp. 561-574, 1986.
- [66] D. Rini, R.-H. Chen et L. Chow, «Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer in saturated FC-72 spray cooling,» *Journal of Heat Transfer*, vol. 124, p. 63–72, 2002.
- [67] R. Selvam, L. Lin et R. Ponnappan, « Direct Simulation of Spray Cooling: Effect of Vapour Bubble Growth and Liquid Droplet Impact on Heat Transfer,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 23-24, 2006.
- [68] R. Selvam, «Modeling thermal boundary-layer effect on liquid-vapour interface dynamics in spray cooling,» *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 23, pp. 356-370, 2009.
- [69] F. Demiray et J. Kim, «Micro-scale heat transfer measurements during pool boiling of FC-72 : effect of subcooling.,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 3257-3268, 2004.
- [70] F. Incropera et D. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer., New York:: 5th ed.John Wiley & Sons, 2004.

- [71] A. Pruthvik, S. G. Raghupathi et Kandlikar, «Contact line region heat transfer mechanisms for an evaporating interface,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 95, p. 296–306, 2016.
- [72] C. Henry, « Nucleate Pool Boiling Characteristics from a Horizontal Microheater,» 2005.
- [73] F. Demiray et J. Kim, «Microscale Heat Transfer Measurements During Pool Boiling of FC-72: Effect of Subcooling,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 3257-3268, 2004.
- [74] F. Tachibana, M. Akiyama et H. Kawamura, «Non-Hydrodynamic Aspects of Pool Boiling Burnout,,» *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 43, pp. 121-130, 1967.
- [75] S. Liaw et V. Dhir, «"Void Fraction Measurements During Saturated Pool Boiling of Water on Partially Wetted Vertical Surfaces,» *Journal of Heat Transfer*, vol. 111, pp. 731-738, 1989.
- [76] G. Xuan et L. Ri, «Spray Impingement Cooling: The State of the Art,» Advanced Cooling Technologies and Applications, 2018.
- [77] E. Silk, J. Kim et K. Kiger, « Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination.,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 4910-4920, 2006.
- [78] Y. Wang, M. Liu, D. Liu, K. Xu et Y. Chen, « Experimental study on the effects of spray inclination on water spray cooling performance in non-boiling regime.,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, pp. 933-942, 2010.
- [79] M. Visaria et I. Mudarwar, «Theoretical and experimental study of the effects of spray inclination on two-phase spray cooling and critical heat flux.,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 2398-2410, 2008.
- [80] J. Rybicki et I. Mudawar, «Single-phase and two-phase cooling characteristics of upwardfacing and downward-facing sprays,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 5-16, 2006.
- [81] W. Cheng, Q. Liu, R. Zhao et H. Fan, « Experimental investigation of parameters effect on heat transfer of spray cooling.,» *Heat and Mass Transfer*., vol. 46:, pp. 911-921, 2010;.
- [82] L. R. Gao X, «Effects of nozzle positioning on single-phase spray cooling.,» International Journal of Heat and Mass Transfer., vol. 115, pp. 1247-1257, 2017.
- [83] X. Gao et R. Li, «Local heat transfer of spray cooling on a thin film heater.,» chez *In: 8th InternationalSymposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion;*, Chengdu, China, 2016.
- [84] S. Freund, A. Pautsch, T. Shedd et S. Kabelac, « Local heat transfer coefficients in spray cooling systems measured with temperature oscillation IR thermography.,» *International Journal of Heat* and Mass Transfer, vol. 51, pp. 2398-2410, 2008.
- [85] G. Xuan et L. Ri, «Spray Impingement Cooling: The State of the Art,» Advanced Cooling *Technologies and Applications*, 2018.

- [86] M. Raudensky, J. Horsky, P. Kotrbacek et M. Pohanka, «COOLING OF ROLLS USED IN HOT ROLLING OF LONG PRODUCTS,» Brno University of Technology, Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory.
- [87] M. Hocine et T. Mohamed, «Thermal diagnostics of highly heated surfaces using water-spray cooling,» *Heat Mass Transfer*, vol. 45, p. 287–295, (2009).
- [88] F. Zhou, «Heat transfer characteristics during pulsed spray cooling with R404A at different spray distances and back pressures,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, p. 813–821, 2016.
- [89] H. Mzad et K. Rabia, «Effect of Spraying Pressure on Spray Cooling Enhancement of Beryllium-Copper Alloy Plate,» *Procedia Engineering*, vol. 157, p. 106 – 113, 2016.
- [90] H. Mzad et M. Elguerri, «SIMULATION OF TWIN OVERLAPPING SPRAYS UNDERNEATH HYDRAULIC ATOMIZERS: INFLUENCE OF SPRAY HYDRODYNAMIC PARAMETERS,» *Atomization and Sprays*, vol. 22, p. 447–460, 2012.
- [91] Y. Haibo, C. Xinchun et S. Xuewen, «Effects of Spray Angle on Spray Cooling of Extruded Aluminum Alloy Plate,» chez AASRI Conference on Modeling, Identification and Control, 2012.
- [92] Z. Zhang, P. Jiang, D. Christopher et X. Liang, «Experimental investigation of spray cooling on micro-, nano- and hybrid-structured surfaces,» *International Journal of Heat and Mass Transfer.* , vol. 80, pp. 26-37, 2015.
- [93] J. Chen, R. Xu, Z. Zhang, X. Chen, X. Ouyang, G. Wang et P. Jiang, «Phenomenon and mechanism of spray cooling on nanowire arrayed and hybrid micro/nano structured surfaces,» *Journal of Heat Transfer*, vol. 140, 2018.
- [94] X. Gao et R. Li, « Impact of a single drop on a flowing liquid film.,» *Physical Review E.*, vol. 92, 2015.
- [95] R. Rioboo, C. Tropea et M. Marengo, «Outcomes from a drop impact on solid surfaces,» *Atomization and Sprays.*, vol. 11, pp. 155-166, 2001.
- [96] R. Li, N. Ashgriz et S. Chandra, « Maximum spread of droplet on solid surface: Low Reynolds and Weber numbers.,» *Journal of Fluids Engineering.*, vol. 132, 2010.
- [97] D. van Dam et C. Clerc, «Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate,» *Physics of Fluids*, vol. 16, p. 3403, 2004.
- [98] S. Chandra et C. Avedisian, «On the collision of a droplet with a solid surface.,» Proceedings of the Royal Society A, vol. 432, pp. 13-41, 1991.
- [99] L. R. Gao X, « Spread and recoiling of liquid droplets impacting solid surfaces.,» *AICHE Journal*, vol. 60, pp. 2683-2691, 2014.
- [100] J. Bernardin, Stebbins et M. I. CJ, «Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface.,» *International Journal of Heat and Mass transfer*, p. 40, 1997;.
- [101] M. Pasandideh-Fard, «Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 22, pp. 201-210, 2001.

- [102] S. Batzdorf et e. all, «Heat transfer during simultaneous impact of two drops onto a hot solid substrate.,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*., vol. 113, pp. 898-907, 2017.
- [103] T. Tran et e. all, «Drop impact on superheated surfaces.,» *Physical Review Letters*, vol. 108, 2012.
- [104] H. Staat et e. all, "Phase diagram for droplet impact on superheated surfaces.," Journal of Fluid Mechanics, vol. 779, 2015.
- [105] s. Adera et e. all, «Non-wetting droplets on hot superhydrophilic surfaces.,» *Nature Communications.*, vol. 4, 2013.
- [106] J. Jung et e. all, «Investigation of single-droplet/wall collision heat transfer characteristicsusing infrared thermometry.,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 92, pp. 774-783, 2016.
- [107] A. Yarin et D. Weiss, « Impact of drops on solid surfaces: Self-similar capillary waves and splashing as a new type of kinematic discontinuity,» *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 283, pp. 141-173, 1995.
- [108] I. Roisman et C. Tropea, « Impact of a drop onto a wetted wall: Description of crown for mation and propagation.,» *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 472, pp. 373-397, 2002.
- [109] G. Cossali, A. Coghe et M. Marengo, «The impact of a single drop on a wetted solid surface,» *Experiments in Fluids*, vol. 22, pp. 463-472, 1997;22.
- [110] S. Alghoul et e. all, «Normal droplet impact on horizontal moving films: An investigation of impact behaviour and regimes.,» *Experiments in Fluids*., vol. 50, pp. 1305-1316, 2011.
- [111] Z. Che et e. all, «Impact of droplets on inclined flowing liquid films,» *Physical Review E*, vol. 92, 2015.
- [112] X. Gao et R. Li, «Cooling enhancement of drop impact on flowing liquid film.,» chez The 2nd Thermal and Fluids Engineering Conference and 4th International Workshop on Heat Transfer, Las Vegas, Nevada, USA, 2017.
- [113] X. Gao et e. all, « Heat transfer of single drop impact on a film flow cooling a hot surface.,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1068-1077, 2017.
- [114] L. Qiu et e. all, «Splashing of high speed droplet train impinging on a hot surface,» *Applied Physics Letters*, vol. 107, 2015.
- [115] N. Karwa, S. Kale et P. Subbarao, « Experimental study of non-boiling heat transfer from a horizontal surface by water sprays.,» *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 32, pp. 571-579, 2007.
- [116] S. Hsieh et Tien, «C. R-134a spray dynamics and impingement cooling in non-boiling regime,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 502-512, 2007.
- [117] W. Yaqing et e. all, «Heat Flux Correlation for Spray Cooling in the Nonboiling Regime,» *Heat Transfer Engineering*, vol. 32, p. 1075–1081, 2011.

- [118] K. Nitin, R. K. Sunil et P. M. Subbarao, «Experimental Study of Non-Boiling Heat Transfer From a Horizontal Surface by Water Sprays,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, p. 571–579, 2007.
- [119] K. Oliphant, B. W. Webb et M. Q. McQuay, «An Experimental Comparison of Liquid Jet Array and Spray Impingement Cooling in the Non-Boiling Regime,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 18, pp. 1-10, 1998.
- [120] R. GAUGLER, Experimental investigation of spray cooling of high temperature surfaces, États-Unis: Carnegie Institute of Technology, 1966.
- [121] H. MULLER et R. JESCHAR, «Enquête sur le passage de Wiirmange dans une zone de refroidissement secondaire simulée de la machine de coulée continue, . 44,» Arch. Eisenhüttenwes, vol. 44, pp. 589-594, 1973.
- [122] K. YANAGI, « Prediction of strip temperature for hot strip mills,» *Trans. I.S.*, vol. 16, pp. 11-19, 1976..
- [123] S. Sujoy Deb et C. Yao, Heat transfer analysis of impacting dilute spray on surfaces beyond the Leidenfrost temperature, Chemistry, 1987.
- [124] L. Bolle et J. C. Moureau, «Spray cooling of hot surfaces,» *Multiphase Science and Technology*, vol. 1, pp. 1-97, 1982.
- [125] K. Takeuchi, J. Senda et Y. K, «Heat Transfer characteristics and the breakup behavior of small droplets impinging upon a hot surface,» *Proceedings ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference*, vol. 1, pp. 165-172, 1983.
- [126] R. J. Issa et S. C. Yao, « Numerical Model for Spray-Wall Impaction and Heat Transfer at Atmospheric Conditions,» *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 19, pp. 441-447, 2005.
- [127] W. P. Klinzing, J. C. Rozzi et I. Mudawar, «Film and transition boiling correlations for quenching of hot surfaces with water sprays,» *Journal of Heat Treating*, vol. 9, pp. 91-103, 1992.
- [128] S. Yao et T. Cox, « A general heat transfer correlation for impacting water sprays on high temperature surfaces,» *Experimental heat transfer*, vol. 15, pp. 207-219, 2002.
- [129] B. Thomas, «Continuous Casting (metallurgy),» Yearbook of Science and Technology, 2004.
- [130] C. Wen-Long, P. Yu-Hang, C. Hua et .. H. P. H. Lei H, «Experimental investigation on the heat transfer characteristics of vacuum spray flash evaporation cooling,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 102, pp. 233-240, 2016.
- [131] H. Mzad et K. Rabia, «Effect of Spraying Pressure on Spray Cooling Enhancement of Beryllium-Copper Alloy Plate,» *Procedia Engineering*, vol. 157, p. 106 – 113, 2016.
- [132] S. C. Johnathan, ENHANCEMENT OF SPRAY COOLING HEAT TRANSFER USING EXTENDED SURFACES AND NANOFLUIDS., vol. University of Maryland, University of Maryland, 2007.
- [133] J. Archambault et all, «Stimulation of transcription by mutations affecting conserved regions of RNA polymerase,» 1998.

- [134] L. Bazart, Détection de changement de mode de fonctionnement : Application a la coulée continue de l'acier, Universit'e de Lorraine.
- [135] Z. Bayvel et L. Orzechowski, Liquid Atomization, Washington, DC: Taylor & Francis, 1993.
- [136] A. Yarin et D. Weiss, «Impact of drops on solid surfaces: Self-similar capillary waves,» *Journal* of Fluid Mechanics, vol. 283, pp. 141-173, 1995.

Annexe

Caractéristiques de la buse de pulvérisation BETE WL

FULL CONE



Low Flow/Full Cone

DESIGN FEATURES

- Advanced whirl plate design produces uniform coverage
- · Male and female connections

SPRAY CHARACTERISTICS

· Medium to coarse atomization Spray pattern: Full Cone. Square patterns available for most sizes. Spray angles: 30°, 60°, 90° and 120° standard Flow rates: 0.13 to 59 gpm



Metal



Full Cone 90

*1/8" PTFE and Polypropylene not available in 120°. **1/8 WL-1/4 not available in Polypropylene.

Full Cone 120°



Dimensions are approximate. Check with BETE for critical dimension applications.

WL Flow Rates and Dimensions Full Cone, 30°, 60°, 90° and 120° Spray Angles Male or Female Pipe Size GALLONS PER MINUTE @ PSI Approx Dimensions for Orifice Metal Only (in.) Wt. (oz.) Nozzle κ 400 PSI 10 30 PSI 40 60 PSI 100 PSI 150 PSI 200 PSI 20 PSI 80 PSI PS Number acto PSI Dia. (in. В С D Metal Plas. WL 1/4* 0.044 0.13 0.18 0.22 0.25 0.30 0.35 0.38 0.47 0.53 0.74 0.043 .88 1.13 0.44 0.56 1/8* 1.00 0.25 WL 1/2 0.088 0.26 0.36 0.44 0.50 0.60 0.69 0.77 0.93 1.07 1.48 0.055 WL 3/4 0.132 0.39 0.54 0.66 0.75 0.91 1.04 1.15 1.40 1.60 2.21 0.072 WL 1 0.177 0.52 1.54 2.13 0.082 0.72 0.87 1.00 1.21 1.39 1.86 2.95 1/4 1.06 1.38 0.56 0.69 1.50 0.38 WL 1 1/2 0.265 0.78 1.08 1.31 1.50 1.81 2.08 2.31 2.79 3.20 4.43 0.109 0.353 1.75 2.00 2.42 0.125 WL 2 1.04 1.44 2.77 3.08 3.72 4.26 5.90 3/8 .25 1.50 0.69 0.88 2.00 0.50 WL 3 0.530 1.56 2.17 2.62 3.00 3.63 4.16 4.61 5.58 6.39 8.85 0.156 WL 4 0.706 2.08 2.89 3.49 4.00 4.84 5.54 6.15 7.44 8.52 11.8 0.188 **WL** 5 0.883 2.61 3.61 4.37 5.00 6.05 6.93 7.69 9.31 10.6 14.8 0.203 1/2 WL 6 1.06 3.13 4.33 5.24 6.00 7.26 8.31 9.23 11.2 12.8 17.7 0.219 .50 2.00 0.88 1.13 3.00 1.00 WL 7 1.24 3.65 5.05 6.11 7.00 8.47 9.70 10.8 13.0 14.9 20.7 0.228 1.41 0.234 WL 8 4.17 5.78 6.99 8.00 9.68 11.1 12.3 14.9 17.0 23.6 3/4 WL 10 1.77 5.21 7.22 8.74 10.0 12.1 13.8 15.4 18.6 21.3 29.5 0.281 1.75 2.13 1.13 1.38 6.00 1.50 WL 12 2.12 6.25 8.66 16.6 22.3 25.6 35.4 0.312 10.5 12.0 14.5 18.5 WL 15 2.65 7.82 10.8 13.1 15.0 18.1 20.8 23.1 27.9 32.0 44.3 0.328 2.19 2.38 1.38 1.63 14.0 3.50 1 WL 20 3.53 10.4 14.4 17.5 24.2 27.7 37.2 42.6 59.0 0.375 20.0 30.8 Flow Rate (GPM) = $K (PSI)^{0.47}$ Standard Materials: Brass, 303 Stainless Steel, 316 Stainless Steel, PVC, Polypropylene, and PTFE

TO ORDER: specify pipe size, connection type, nozzle number, spray angle, and material.

24

Spray angle performance varies with pressure. Contact BETE for specific data on critical applications. www.BETE.com