

I. Introduction

Depuis les années 80, de nombreuses études ont été réalisées pour comprendre le refroidissement par spray, dans des configurations très variées. On distingue des refroidissements par spray en milieu confiné, en apesanteur, par aspersion sur des plaques verticales ou horizontales ; avec des recouvrements totaux ou partiels de la surface à refroidir, on rencontre aussi l'utilisation de plusieurs buses simultanément. Les paramètres étudiés concernent les propriétés du spray (diamètre des gouttes, vitesse des gouttes, débit surfacique, flux surfacique de gouttes), ainsi que les propriétés de la surface chauffée (température/régime de refroidissement, état de surface, affinité entre le liquide et le matériau de la surface, formes et dimensions, propriétés thermo physiques du matériau constituant de la surface). L'angle entre l'axe du spray et la plaque, le type de liquide, la dissolution de gaz dans le liquide sont également d'autres paramètres permettant la compréhension du refroidissement par spray.

La multitude des configurations étudiées a permis de mettre en lumière les mécanismes du refroidissement par spray. Toutefois, la difficulté se pose lors de la modélisation, en ce qui concerne le nombre et la complexité de ces mécanismes. De ce fait, une bonne compréhension des liens entre les conditions du refroidissement et chacun des mécanismes est nécessaire afin de faciliter l'étude numérique.

La buse contrôle le débit, atomise le liquide en gouttelettes et les disperse selon un motif spécifique. La buse appropriée doit être choisie pour le travail souhaité, aucune buse ne peut répondre à tous les besoins de pulvérisation. Le perfectionnement des caractéristiques du jet lors de la conception de la buse permet d'obtenir une meilleure dispersion et une économie de consommation d'eau. Cependant, l'optimisation des paramètres hydrodynamique du spray permet un meilleur refroidissement et une extraction de la chaleur. Dans ce chapitre trois paramètres hydrodynamiques ont été étudiés par simulation numérique dans le but d'examiner leurs effets sur le refroidissement monophasique.

II. Simulation transitoire du refroidissement par pulvérisation

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence des paramètres impliqués dans le processus de refroidissement par projection d'eau sur une plaque d'aluminium à une température de 92 ° C. Vu que le comportement des paramètres de refroidissement par pulvérisation, lors d'un refroidissement monophasique, est rarement examiné précédemment, et qu'il n'y a que peu d'études sur ce sujet.

Une étude détaillée sur l'effet du débit volumique, de la pression du fluide et de la hauteur de la buse au-dessus de la plaque a été réalisée à l'aide de la version 5.2 du code COMSOL Multiphysics. Tout d'abord, une variation du débit de 0,497 à 1 *L/min* est effectuée. Ensuite, la pression d'entrée a été variée de 0,7 à 2,1 *bars*. L'influence de la distance entre la buse et la surface d'impact a été également étudiée dans une large plage de hauteur (100 à 505 mm). L'influence des paramètres cités précédemment, sur la température, sur l'énergie interne totale, sur le flux de chaleur convectif, sur le nombre de Reynolds, sur la distribution et sur la vitesse des gouttelettes a été étudiée.

Initiation au code COMSOL Multiphysics

La simulation numérique est une approche donnant la possibilité aux chercheurs d'analyser les comportements de plusieurs phénomènes qui par leur complexité, échappent au calcul classique. La modélisation, quant à elle, est la mise en équations de ces phénomènes, pour la large gamme de problèmes scientifiques basés sur des équations aux dérivées partielles, COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis ou encore interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab.

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux limites, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique, MDF...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit. Selon le choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D.

II.1.1 Analyse par éléments finis FEA

L'analyse par éléments finis (FEA) est la modélisation de produits et de systèmes dans un environnement virtuel ; L'objectif est de détecter et de résoudre des problèmes potentiels (ou réels). La FEA est la mise en pratique de la méthode des éléments finis (FEM), qui est utilisée par les ingénieurs et les scientifiques pour une modélisation mathématique et une résolution numérique de problèmes structurels complexes, de fluides et multiphysiques.

Le but du logiciel d'analyse par éléments finis (FEA) est de réduire le nombre de prototypes et d'expériences qui doivent être exécutés lors de la conception, de l'optimisation ou du contrôle d'un appareil ou d'un processus.

Une fois qu'un modèle FEA est établi et s'est révélé utile pour prédire les propriétés réelles, il peut générer la compréhension et l'intuition pour améliorer considérablement la conception et le fonctionnement d'un appareil ou d'un processus. À ce stade, les méthodes d'optimisation et le contrôle automatique peuvent fournir le dernier degré d'améliorations qui peuvent être difficiles à obtenir uniquement par intuition. La plupart des logiciels FEA modernes proposent des méthodes pour décrire le contrôle automatique et incorporer ces descriptions dans des modèles mathématiques et numériques. Les méthodes d'optimisation sont généralement incluses dans le processus de solution.

II.1.2 Méthode des éléments finis

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. A l'aide de cette méthode, le logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie.

En analyse numérique, la méthode des éléments finis (MEF, ou FEM pour *finite element method*) est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, etc.).

Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, déformation d'une structure métallique, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle ; ce dernier représente le cas étudié dans cette thèse.

II.1.2.1 Principe général

Considérons un domaine Ω (typiquement une portion de l'espace) dont la frontière est notée $\delta\Omega$ ou Σ . Nous cherchons à déterminer une fonction u définie sur Ω , qui est une solution d'une équation aux dérivées partielles (EDP) pour des conditions aux limites données. L'EDP décrit le comportement physique du système, il s'agit par exemple des lois de l'élasticité pour un problème de résistance des matériaux ou des équations de Maxwell pour les problèmes d'électromagnétisme ou l'équation de la chaleur comme dans le cas étudié dans cette thèse. Les conditions aux limites sont les contraintes s'exerçant sur le système. Par exemple, pour un problème de transfert de chaleur, on impose la température de certaines parties du système, et/ou l'isolation d'autres parties. La méthode des éléments finis (MEF) permet de résoudre de manière discrète et approchée ces problèmes.

II.1.2.2 La discrétisation

La discrétisation consiste à "découper" le domaine Ω , c'est-à-dire à chercher une solution du problème sur un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux ; il y a donc une redéfinition de la géométrie. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème. Dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les **pavés** sont les *éléments finis*.

Sur chacun des éléments finis, il est possible de linéariser l'EDP, c'est-à-dire de remplacer l'équation aux dérivées partielles par un système d'équations linéaires, par approximation. Ce système d'équations linéaires peut se décrire par une matrice ; il y a donc une matrice par élément fini. Cependant, les conditions aux limites sont définies sur les frontières du système global et pas sur les frontières de chaque élément fini ; il est donc impossible de résoudre indépendamment chaque système. Les matrices sont donc réunies au sein d'une matrice globale. Le système d'équations linéaires global est résolu par l'ordinateur. L'EDP est résolue aux nœuds du maillage, c'est-à-dire que la solution est calculée en des points donnés (résolution discrète) et non en chaque point du domaine Ω . Cela nécessite de pouvoir interpoler, c'est-à-dire déterminer les valeurs en tout point à partir des valeurs connues en certains points.

II.1.2.3 Choix du maillage

Un modèle par éléments finis (FE) comprend un système de points, appelés "nœuds", qui définissent la forme de la conception. Les éléments finis sont connectés à ces nœuds et ils forment le maillage d'éléments finis qui contient les propriétés du matériau et de la structure du

modèle, définissant ainsi la manière dont ce dernier réagira dans certaines conditions. La densité du maillage d'éléments finis peut varier dans le matériau, en fonction de la modification des niveaux de contraintes dans une zone particulière. Les régions qui subissent des modifications de contraintes importantes nécessitent habituellement une densité de maillage plus forte que celles subissant peu ou pas de variations de contraintes. Les points d'intérêt peuvent inclure des points de rupture d'un matériau préalablement testé, d'angles, de zones aux détails complexes et subissant de fortes contraintes.

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage. D'habitude on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'interdit de choisir des maillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêt (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier) ; cependant, il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré, plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivés partielles.

II.1.2.4 Principaux types d'éléments utilisé

➤ **En géométrie bidimensionnelle :**

Triangles

Triangles de degré 1, (triangles à 3 nœuds, fonctions linéaires)

Triangles de degré 2 (triangles à 6 nœuds, polynômes de degré 2)

Quadrilatères

Quadrilatères de degré 1 (carrés à quatre nœuds, fonctions linéaires)

Quadrilatères de degré 2 (carrés à 8 ou 9 nœuds, polynômes de degré 2)

➤ **En géométrie tridimensionnelle (Fig. III.1) :**

Tétraèdres

Tétraèdres de degré 1, (quatre nœuds, fonctions linéaires)

Tétraèdres de degré 2, (dix nœuds, polynômes de degré 2)

Hexaèdres

Hexaèdres de degré 1, (huit nœuds, fonctions linéaires)

Hexaèdres de degré 2, (vingt nœuds, polynômes de degré 2)

Hexaèdres triquadratique, (vingt-sept nœuds, polynômes de degré 2)

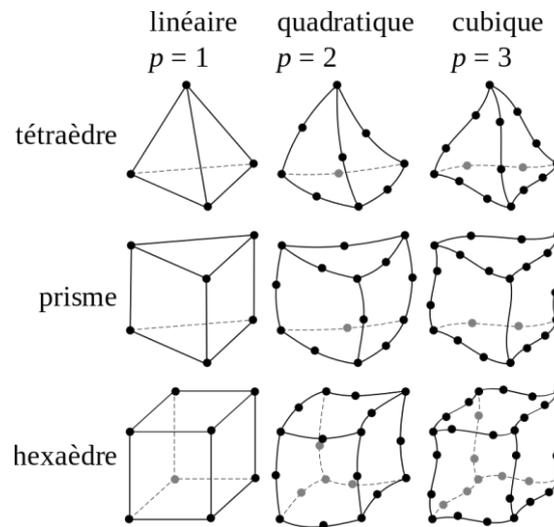


Fig. III.1 Principaux types d'éléments utilisés en 3D.

II.1.2.5 Erreurs et précision

Généralement il existe trois sources d'erreurs, c'est-à-dire d'écart entre la solution calculée et les valeurs réelles :

- La modélisation de la réalité : le domaine Ω correspond en général à des pièces matérielles, le calcul se fonde sur des versions idéales (sans défaut) des pièces, de la matière et des conditions aux limites ; cette source d'erreur n'est pas spécifique à la méthode des éléments finis.
- La géométrie idéale et continue est remplacée par une géométrie discrète, et les valeurs sont interpolées entre des points ; plus les points sont espacés, plus la fonction d'interpolation risque de s'écarter de la réalité, mais à l'inverse, un maillage trop fin conduit à des temps de calculs extrêmement longs et nécessite des ressources informatiques importantes, il faut donc trouver un compromis entre coût du calcul et précision des résultats ;
- Pour les calculs numériques, les erreurs d'arrondissement sont inévitables, les nombres étant représentés par un nombre fini d'octets.

L'un des défis de la simulation consiste à maîtriser ces erreurs, notamment :

- En simplifiant la géométrie (*defeaturing*), en enlevant des détails qui se situent loin des zones que l'on veut étudier et ayant une faible influence sur le résultat ;

- En choisissant des maillages adaptés, par exemple, des éléments de type poutre pour des pièces élancées, ou de type coque pour des pièces fines, en découpant la pièce pour pouvoir faire des maillages réguliers sur certaines zones, en affinant le maillage dans les zones critiques...

II.2 Description du schéma numérique

Tout d'abord la simulation a été basée sur un schéma numérique contenant (Fig. III.2) :

- Un volume de contrôle cylindrique définissant l'air dans les conditions normales de pression et de température ;
- Une plaque d'aluminium de 6 mm d'épaisseur et de 1200 mm² de surface ;
- Une buse de pulvérisation mécanique.

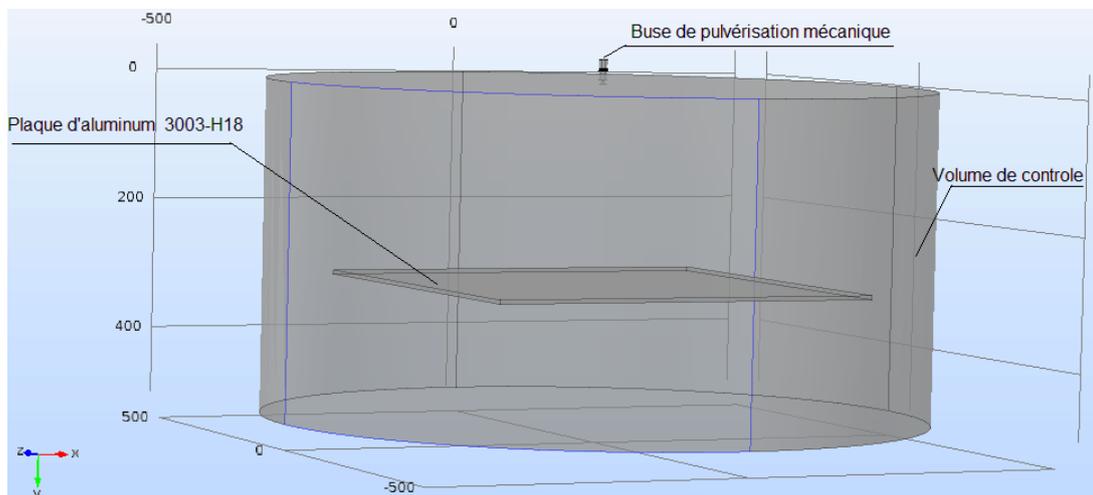


Fig. III.2 Représentation de la géométrie de simulation.

Le refroidissement est réalisé avec un spray à cône plein obtenu grâce à une buse de pulvérisation BETE WL6 avec un angle de pulvérisation qui peut varier de 30° à 120° (voir annexe). La plaque à refroidir est un alliage d'aluminium 3003-H18. Ce dernier est un alliage de la famille d'aluminium et du manganèse corroyé. Il peut être travaillé à froid (contrairement à certains autres types d'alliages d'aluminium, traité thermiquement) pour produire des états ayant une résistance plus élevée mais une faible ductilité. Comme la plupart des autres alliages aluminium-manganèse, le 3003 est un alliage à usage général offrant une résistance modérée, et une bonne résistance à la corrosion. Il est généralement laminé et extrudé, mais non forgé. En tant qu'alliage corroyé, il n'est pas utilisé dans la coulée. En revanche, il est couramment utilisé dans les applications de tôle (telle que les tôle des panneaux PV), les toitures et

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

réservoirs, appareils à pression. La majorité de ces applications implique l'utilisation du refroidissement pour l'optimisation du rendement. En effet, le choix de la nuance 3003-H18 a été basé sur cette hypothèse. Une buse mécanique à cône plein (Fig. III.3) a été utilisée pour la génération du spray.

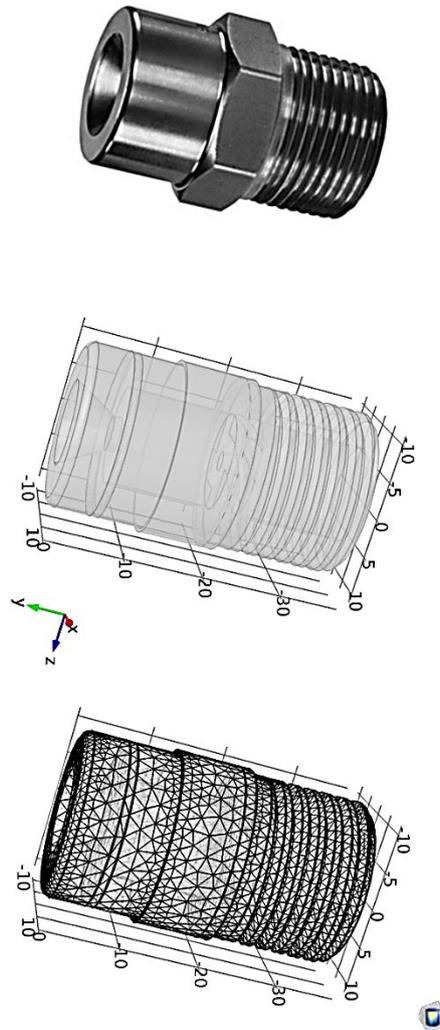


Fig. III.3 Conception, géométrie et maillage de la buse de pulvérisation BETE WL6.

Un maillage tétraédrique libre a été appliqué pour tous le schéma numérique. Une grille très fine est appliquée pour la buse (Fig. III.3) et une grille extra-grossière pour la plaque d'aluminium et le volume de control (Fig. III.4). La composition du maillage est présentée dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Composition du maillage du schéma numérique.

Le Maillage complet se compose de			
Éléments de domaine		41640	
Éléments de délimitation (<i>Boundary elements</i>)		5100	
Éléments de bord		541	
Tétraédrique fin		Tétraédrique extra grossière	
Taille d'élément maximale [mm]	38.9	Taille d'élément maximale [mm]	242
Taille d'élément minimale [mm]	7.33	Taille d'élément minimale [mm]	51.3

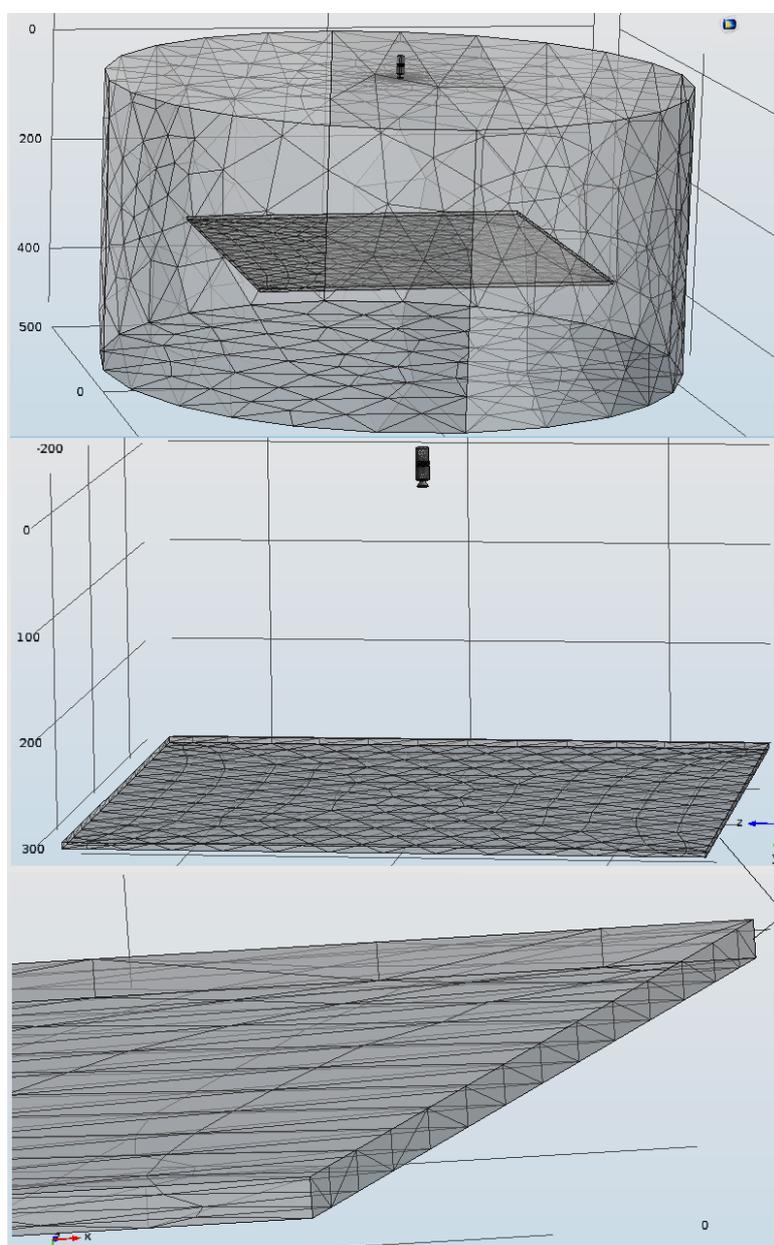


Fig. III.4 Maillage 'Free tetrahedral' du domaine de calcul.

II.3 Modélisation et simulation de la problématique

En ce qui concerne les conditions initiales ; la plaque d'aluminium est supposée être entourée par de l'air à pression atmosphérique et à température ambiante. L'application numérique réalisée est basée sur trois modèles de simulation 3D. Le premier modèle consiste à simuler en régime stationnaire l'écoulement du fluide dans la buse de pulvérisation, à l'extérieur de la buse et autour de la plaque d'aluminium (Fig. III.5).

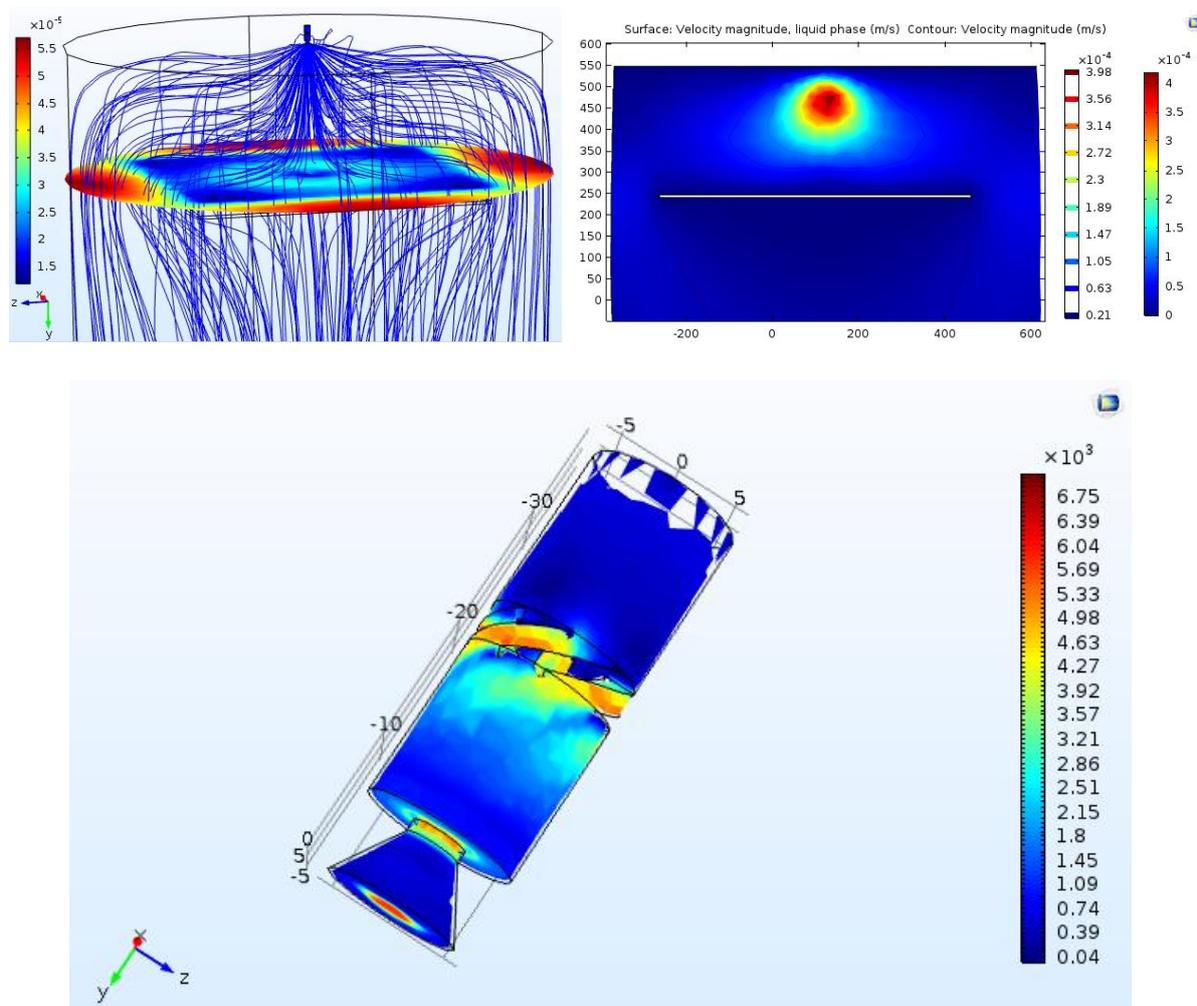


Fig. III.5 Ecoulement du spray autour de la plaque à l'intérieur et à l'extérieur de la buse.

Les résultats obtenus sont utilisés pour la simulation d'un second modèle. Ce dernier a pour but de simuler le spray (*the bubbly flow*) en régime permanent en prenant en considération la transformation du liquide en une multitude petite gouttelettes (Fig. III.6). En fin ; le troisième modèle utilise les résultats obtenus précédemment pour simuler en régime transitoire le transfert de chaleur dans le fluide et le solide (Fig. III.7). Etant donné que la température de la plaque

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

d'aluminium est inférieure à la température de saturation de l'eau, le transfert de chaleur avec changement de phase n'est pas pris en considération. En ce qui concerne les conditions initiales de pression ; on suppose dans un premier temps que la pression du liquide à l'entrée de la buse est constante (0.7 bar).

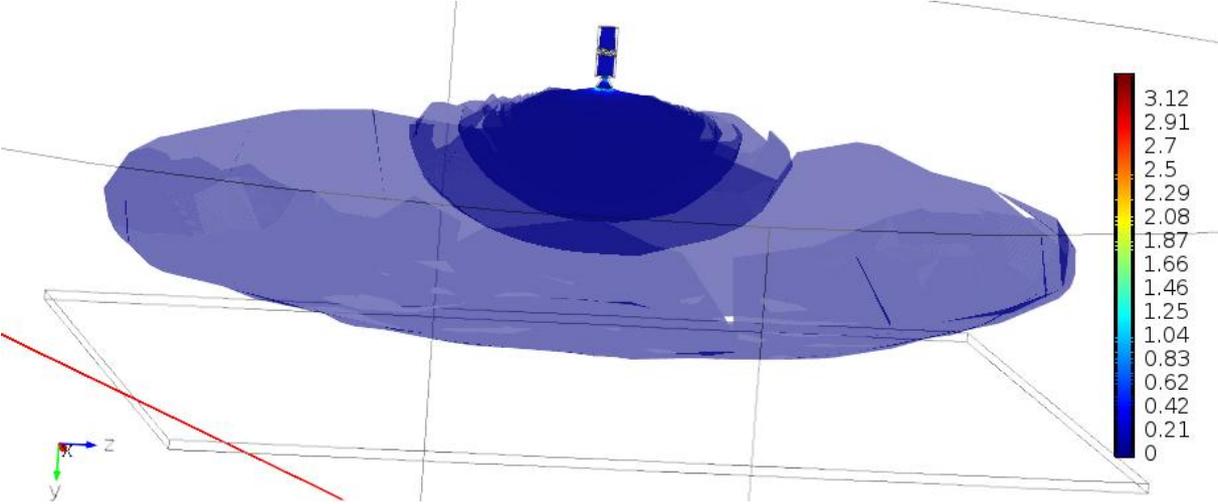


Fig. III.6 Simulation du spray (bubbly flow); distribution et vitesse des gouttes [m/s].

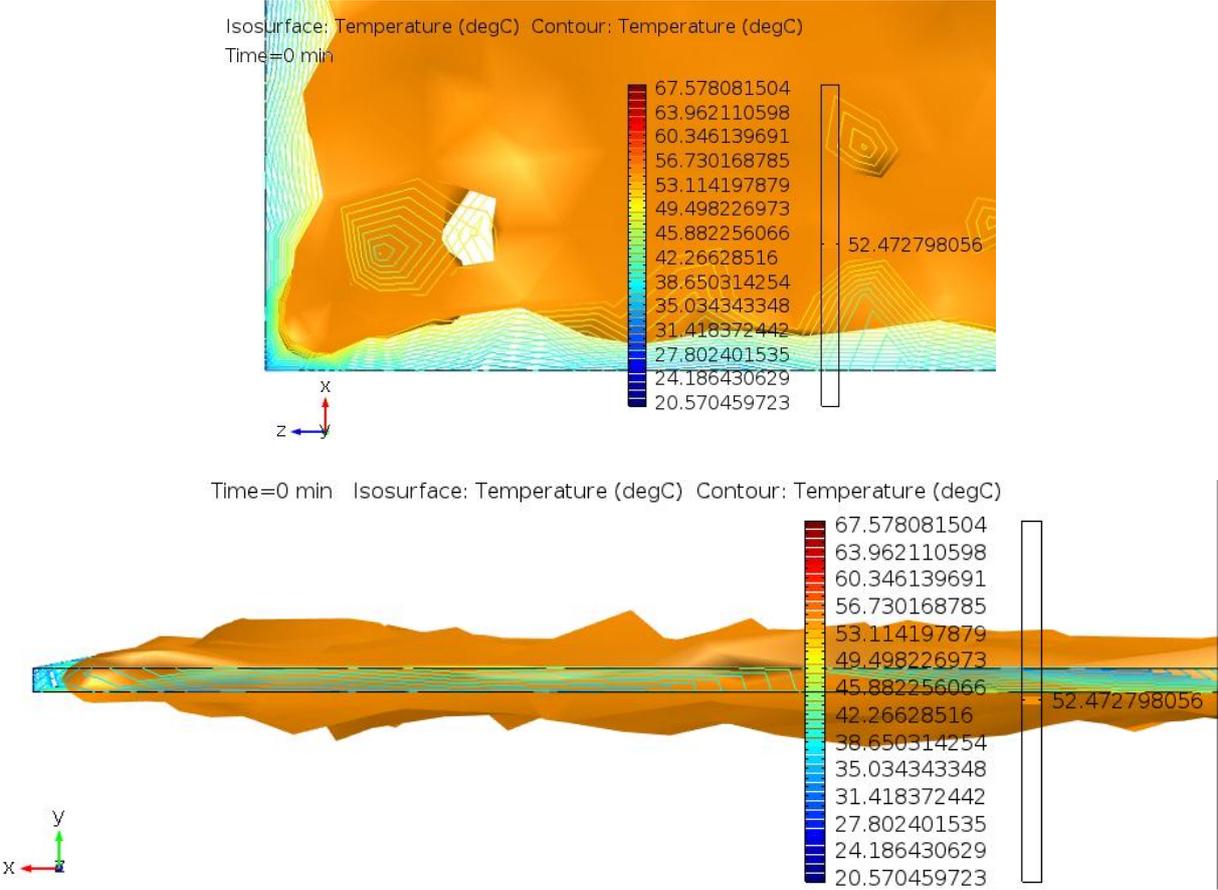


Fig. III.7 Simulation du transfert de chaleur dans le solide et le fluide.

II.3.1 Simulation de l'écoulement du fluide

La résolution des équations de Navy Stokes prend beaucoup de temps et nécessite un ordinateur professionnel. De ce fait, l'écoulement du fluide a été simulé en mode stationnaire. De plus, pour des raisons de simplification, nous avons utilisé l'écoulement laminaire au lieu de l'écoulement turbulent.

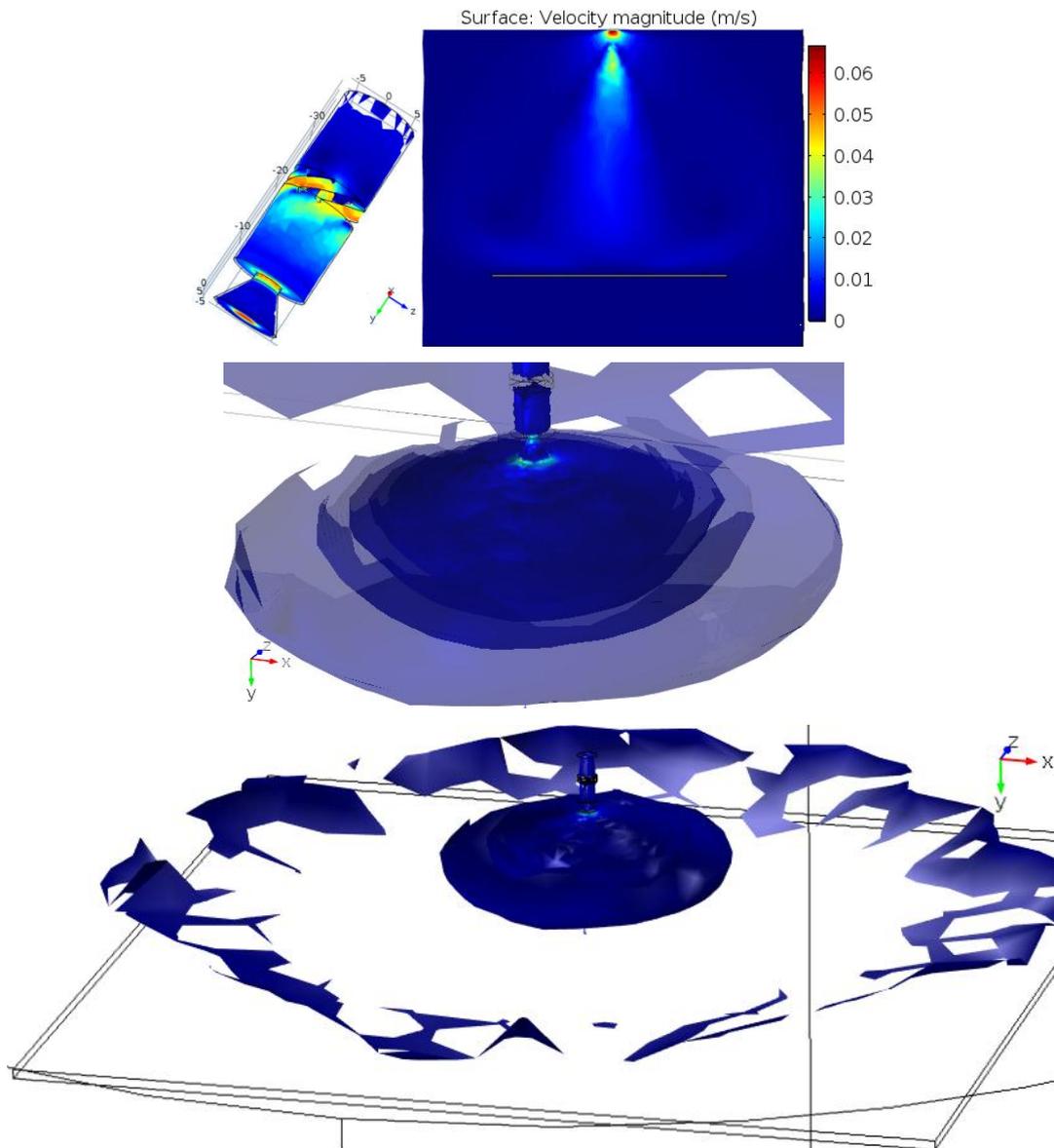


Fig. III.8 Simulation du spray à l'intérieure et l'extérieure de la buse.

Comme il a été mentionné précédemment, La simulation du spray a été réalisée en deux étapes. La première est la simulation de l'écoulement laminaire autour de la plaque d'aluminium, à l'intérieur et à l'extérieur de la buse. Les résultats obtenus ont été utilisés dans la deuxième étape, qui consiste à simuler le flux laminaire des bulles (Fig. III.8).