



**MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE**

**PAR
MARTIN FORTÉ**

**MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT DE
L'ALUMINIUM SEMI-SOLIDE DANS LE
MOULAGE SOUS PRESSION**

OCTOBRE 2006



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Modélisation de l'écoulement de l'aluminium semi-solide dans le moulage sous pression

Résumé

L'origine de la technologie de la mise en forme des métaux semi-solides remonte à plus de trente ans. L'industrialisation du moulage d'alliages semi-solides ne s'est répandue que depuis une dizaine d'année et elle a amené une nouvelle problématique, soit le développement de moules spécifiques. Les concepts utilisés pour fabriquer des moules pour l'injection d'alliages liquides ne garantissent pas la performance avec l'utilisation d'alliages semi-solides. Surtout dans le moulage sous pression où la phase de remplissage du moule est critique lors de l'utilisation d'alliages semi-solides. Des outils de simulation numérique sont nécessaires pour concevoir et optimiser les moules. Ce travail a donc comme objectif de déterminer la validité d'un modèle mathématique à une phase utilisé dans un environnement de simulation isotherme pour reproduire l'écoulement de l'aluminium semi-solide dans le moulage sous pression. Un moule utilisé pour fabriquer des éprouvettes de traction sert de témoin. Ce moule a été choisi parce qu'il présente des difficultés lors de son remplissage.

Dans un premier temps, la modélisation physique avec un fluide analogue est utilisée pour reproduire les conditions d'injection de l'aluminium semi-solide. La pâte de tomate a été choisie comme fluide analogue pour ses propriétés pratiques et rhéologiques. Une réplique de moule a été fabriquée. Celle-ci utilise des parties en acrylique pour permettre l'enregistrement vidéo du remplissage du moule. Une caméra numérique capturant jusqu'à mille images par seconde a réalisé cet enregistrement. Diverses conditions de vitesses d'injections et de configuration du système de ventilation ont été mises à l'essai et enregistrées. Ces conditions ont été reproduites dans le logiciel de simulation ProCAST. Un modèle mathématique à une phase a servi à modéliser la viscosité de la pâte de tomate en fonction du taux de cisaillement. Ce modèle a été étalonné d'après la caractérisation rhéologique expérimentale de la pâte de tomate. Les résultats des simulations montrent une bonne concordance avec les vidéos des remplissages expérimentaux. L'environnement de simulation a ainsi été validé.

Par la suite, un modèle mathématique a été utilisé pour représenter l'aluminium semi-solide dans le même environnement de simulation. Le modèle de rhéologie

de l'aluminium semi-solide est une loi de puissance. Les caractéristiques de ce modèle ont été tirées des travaux antérieurs d'Orgéas. Ils permettent de comparer les résultats avec d'autres dans la littérature. Pour valider ces simulations, une série de moulages de pièces en aluminium semi-solide a été réalisée. Cette série comprend plusieurs pièces de remplissage partiel et quelques pièces complètes. Les pièces de remplissage partiel montrent l'écoulement du fluide lors de l'injection à divers temps fixés. Les pièces complètes permettent d'analyser les produits finis en métallographie. La combinaison de ces résultats montre que les simulations de l'écoulement de l'aluminium semi-solide permettent de prévoir le patron de remplissage. Le modèle à une phase n'est cependant pas en mesure de reproduire la ségrégation des phases, présente dans le moulage expérimental. Ce phénomène peut être évité en produisant une distribution symétrique du fluide dans le moule.

La comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec l'aluminium semi-solide et avec la pâte de tomate permet d'établir que cette dernière est un bon fluide analogue pour l'aluminium semi-solide. La modélisation physique peut donc être utilisée dans le développement de moules. Il est plus rapide de simuler diverses vitesses d'injection en modélisation physique qu'en modélisation mathématique.

Les outils pour la conception et le développement de moules spécifiques à l'utilisation d'aluminium semi-solide ont été validés. Un modèle à une phase permet de reproduire le comportement macroscopique de l'aluminium semi-solide lors de l'injection dans un moule, si le moule n'est pas propice à la ségrégation des phases. Ceci permet de mettre à l'essai plusieurs géométries de moule sans nécessiter de fabrication.

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) en collaboration étroite avec le Centre des Technologies de l'Aluminium (CTA). L'auteur est sous la supervision du Professeur André Charette de l'UQAC et du Docteur Dominique Bouchard du CTA. Un support particulier a été fourni par Frédéric Pineau (CTA) en modélisation. La fabrication du moule a été assurée par Antoine Pelletier de l'Institut des matériaux industriels. La modélisation physique a été réalisée à l'usine pilote installée dans les locaux chez STAS avec Roberto Chevarie et Stéphane Leclerc. Chang-Qing Zheng (CTA) a aussi permis de réaliser les pièces moulées sur la presse. Le procédé SEED, breveté par Alcan Inc., a été utilisé pour produire l'aluminium semi-solide.

Table des matières

1. Introduction	1-1
1.1. Problématique	1-1
1.2. Objectifs	1-2
2. Revue de littérature	2-1
2.1. Principe de la mise en forme des alliages semi-solides.....	2-1
2.2. Avantages de l'utilisation de métaux semi-solides	2-2
2.2.1. Écoulement et faible porosité	2-2
2.2.2. Propriétés mécaniques	2-3
2.2.3. Cadence de production	2-4
2.3. Préparation de l'aluminium semi-solide	2-5
2.3.1. Procédé SEED	2-6
2.3.2. Autres méthodes	2-7
2.4. Modélisation de l'écoulement des métaux semi-solides	2-11
2.4.1. Modélisation numérique.....	2-11
2.4.2. Modélisation physique.....	2-14
3. Théorie	3-1
3.1. Rhéologie des métaux semi-solide	3-1
3.1.1. Dépendance à la fraction solide	3-2
3.1.2. Dépendance à la morphologie	3-4
3.1.3. Dépendance au taux de cisaillement.....	3-5
3.1.4. Dépendance au temps	3-7
3.1.5. Seuil de cisaillement	3-8
3.2. Modèles mathématiques	3-9
3.2.1. Modèle de loi de puissance	3-9
3.2.2. Modèle de Herschel-Bulkley	3-10
3.2.3. Modèle de structure interne transitoire	3-10
3.3. Caractérisation rhéologique de l'aluminium semi-solide	3-11
3.4. Profils de vitesse dans un tube.....	3-15
3.4.1. Newtonien.....	3-15

3.4.2.	Non-newtonien	3-16
3.5.	Nombres adimensionnels	3-19
3.5.1.	Nombre de Reynolds.....	3-20
3.5.2.	Nombre de Bingham	3-25
3.5.3.	Conditions de similarité.....	3-30
4.	Modélisation physique.....	4-1
4.1.	Description du montage	4-1
4.1.1.	Presse et environnement	4-1
4.1.2.	Moule	4-2
4.1.3.	Pièce moulée	4-3
4.1.4.	Cadre et empreinte	4-4
4.1.5.	Cylindre et piston	4-7
4.1.6.	Installation et opération dans la presse	4-8
4.1.7.	Fluide analogue.....	4-10
4.1.8.	Caméra.....	4-14
4.1.9.	Éclairage	4-15
4.2.	Procédure expérimentale	4-17
4.2.1.	Essais avec l'eau	4-17
4.2.2.	Essais sur la pâte de tomate.....	4-20
4.2.3.	Essais sur l'aluminium semi-solide	4-24
5.	Modélisation numérique.....	5-1
5.1.	Présentation du maillage	5-1
5.2.	Mise en oeuvre du modèle non-newtonien	5-3
5.3.	Description des conditions limites	5-3
5.4.	Système d'équations résolu	5-4
5.5.	Simulations réalisées	5-7
6.	Résultats de la modélisation physique	6-1
6.1.	Résultats obtenus avec l'eau.....	6-1
6.1.1.	Eau à basse vitesse ($Re=8800$).....	6-2
6.1.2.	Eau à haute vitesse ($Re=52800$)	6-3
6.2.	Résultats obtenus avec la pâte de tomate.....	6-6
6.2.1.	Pâte de tomate à basse vitesse ($Re=5.15$)	6-6
6.2.2.	Pâte de tomate à haute vitesse ($Re=114$).....	6-8

6.2.3.	Pâte de tomate à 0.1 m/s ($Re=17.1$)	6-11
6.3.	Résultats obtenus avec l'aluminium semi-solide	6-12
6.4.	Observations métallographiques.....	6-15
6.4.1.	Défauts métallurgiques.....	6-16
6.4.2.	Signes de l'écoulement et défauts de remplissages.....	6-18
7.	Résultats de la modélisation numérique	7-1
7.1.	Simulations de l'écoulement d'eau	7-1
7.1.1.	Eau à basse vitesse ($Re=8800$).....	7-1
7.1.2.	Eau à haute vitesse ($Re=52800$)	7-3
7.2.	Simulations de l'écoulement de pâte de tomate.....	7-5
7.2.1.	Pâte de tomate à basse vitesse ($Re=5.15$)	7-5
7.2.2.	Pâte de tomate à haute vitesse ($Re=114$).....	7-7
7.3.	Simulation de l'écoulement d'aluminium semi-solide.....	7-10
8.	Discussion des résultats	8-1
8.1.	Validité des résultats de modélisation numérique	8-1
8.1.1.	Comparaison des résultats impliquant l'eau	8-1
8.1.2.	Comparaison des résultats impliquant la pâte de tomate	8-3
8.1.3.	Comparaison des résultats impliquant l'aluminium semi-solide.....	8-6
8.1.4.	Qualité générale de la simulation.....	8-8
8.2.	Pertinence de la modélisation physique.....	8-9
8.2.1.	Eau vs. aluminium liquide	8-9
8.2.2.	Pâte de tomate vs. aluminium semi-solide	8-10
9.	Conclusions.....	9-1
10.	Recommandations	10-1
11.	Suggestions pour la poursuite du projet.....	11-1

Liste des figures et tableaux

figure 1 : Limite élastique vs allongement à la rupture pour diverses méthodes de production, AlSi7Mg0.3 [8]	2-3
figure 2 : Schématisation de la fabrication de lopins de AlSS SEED [17].....	2-6
figure 3 : Microstructure typique obtenue par SEED [17].....	2-7
figure 4 : Schématisation du procédé du MIT [18].....	2-8
figure 5 : Microstructure typique obtenue par MIT [13]	2-9
figure 6 : Schématisation du procédé UBE [19]	2-10
figure 7 : Microstructure typique obtenue par UBE [16].....	2-10
figure 8 : Microstructure typique obtenue par MHD [16].....	2-11
figure 9 : a) Remplissage partiel de A356 à 7.8 m/s, b) simulation correspondante [23]	2-12
figure 10 : a) Remplissage partiel de A356 à 2.0 m/s, b) simulation correspondante [23]	2-12
figure 11 : Seuil de cisaillement en fonction de la fraction solide pour l'alliage A356 [24]	2-13
figure 12 : Résultats expérimentaux utilisant divers fluides analogues (droite); et simulations correspondantes (gauche) [32]	2-15
figure 13 : Résultats expérimentaux d'injection de peinture dans un moule avec obstacles; vitesse d'injection de 5m/s (gauche) et 8 m/s (droite) [33]	2-16
figure 14 : Résultats de simulations correspondant à la figure 13; vitesse d'injection de a) 5 m/s et b) 8 m/s [33].....	2-16
figure 15 : Évolution de la viscosité apparente de A356 pendant un refroidissement continu à un taux de cisaillement de 3.1 s ⁻¹ ; [38].....	3-2
figure 16 : Fraction solide de A356 selon un modèle de Scheil	3-3
figure 17 : Relation entre la température et la viscosité de A356, à un taux de cisaillement de 1 s ⁻¹	3-4
figure 18 : Microstructure en rosette (A) et globulaire (B) dans A356.....	3-5
figure 19 : Viscosité de A356 à différentes fractions solides (d : 0.63, e : 0.50, f : 0.47) [40]	3-6
figure 20 : Thixotropie de A356, fs=0.30. Au temps 0, le taux de cisaillement est passé de A) 105 à 1.7 s ⁻¹ et B) 1.7 à 105 s ⁻¹ [41].....	3-7
figure 21 : Viscosité de A356 tel qu'observée par différents expérimentateurs [20, 22, 40].....	3-12
figure 22 : Fraction solide de l'AlSS en fonction de la température (Scheil).....	3-13
figure 23 : Courbe de déformation utilisée pour l'AlSS; contrainte de cisaillement.....	3-14
figure 24 : Courbe de déformation utilisée pour l'AlSS; viscosité.....	3-14
figure 25 : Profil de vitesse newtonien.....	3-16
figure 26 : Profil de vitesse non-newtonien.....	3-18
figure 27 : Profil du nombre de Reynolds non-newtonien	3-23
figure 28 : Profil du nombre de Bingham non-newtonien	3-27
tableau 1 : Propriétés des fluides utilisés pour le dimensionnement	3-32
figure 29 : Dimensionnement du modèle physique avec le fluide analogue	3-33
figure 30 : Presse Bühler de type Vision B; (ref : site internet de Bühler A.G.)	4-2
figure 31 : Schéma d'une pièce formée par la moule ASTM.....	4-4
figure 32 : Schéma du moule de modélisation physique	4-5
figure 33 : Détail de la moitié mobile du moule (cadre et inserts)	4-6
figure 34 : Le moule pour modélisation physique	4-7
figure 35 : Schéma du cylindre et du piston utilisés pour la modélisation physique	4-8
figure 36 : Le moule installé dans la presse.....	4-9

figure 37 : Pâte de tomate Heinz en contenant de 100 oz.....	4-12
figure 38 : Modèle de viscosité de la pâte de tomate.....	4-13
figure 39 : Camera haute vitesse FASTCAM-PCI 10X.....	4-14
figure 40 : Système d'éclairage et caméra dans la boîte blanche.....	4-16
figure 41 : Nettoyage du moule.....	4-22
figure 42 : Exemple de courbe de remplissages.....	4-26
tableau 2 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium 356.....	4-26
figure 43 : Maillage de la pièce moulée, vue d'ensemble et détail d'une éprouvette.....	5-2
figure 44 : Régions d'application des conditions limites.....	5-4
figure 45 : Injection d'eau à 0.05 m/s.....	6-2
figure 46 : Injection d'eau à 0.3 m/s (détail du divergent d'une éprouvette).....	6-4
figure 47 : Injection d'eau à 0.3 m/s (détail du coude).....	6-5
figure 48 : Injection de pâte de tomate à 0.05 m/s.....	6-7
figure 49 : Injection de pâte de tomate à 0.3 m/s.....	6-9
figure 50 : Injection de pâte de tomate à 0.3 m/s (détail du coude).....	6-10
figure 51 : Injection de pâte de tomate à 0.1 m/s.....	6-12
figure 52 : Assemblage de quatre photos de remplissage partiel avec de l'AlSS à 0.1 m/s.....	6-14
figure 53 : Détail des 2 éprouvettes de droite.....	6-15
figure 54 : Film d'oxide présent dans le haut du divergent d'une éprouvette.....	6-16
figure 55 : Divergent d'une éprouvette montrant une concentration de porosités dans le haut.....	6-17
figure 56 : Coupe longitudinale de la section du mors supérieur d'une éprouvette, présence d'une reprise en écaille.....	6-18
figure 57 : Longue faille circonférentielle dans une section transversale d'une éprouvette.....	6-20
figure 58 : Faille longitudinale dans le haut d'une éprouvette.....	6-20
figure 59 : Simulation de l'injection d'eau à 0.05 m/s.....	7-2
figure 60 : Simulation de l'injection d'eau à 0.3 m/s.....	7-4
figure 61 : Simulation de l'injection de pâte de tomate à 0.05 m/s.....	7-6
figure 62 : Simulation de l'injection de pâte de tomate à 0.3 m/s.....	7-8
figure 63 : Simulation de l'injection de pâte de tomate à 0.3 m/s (détail du coude extérieur).....	7-9
figure 64 : Simulation de l'injection d'aluminium semi-solide à 0.1 m/s.....	7-11
figure 65 : Exemple d'amélioration du système de distribution du moule pour éprouvettes ASTM.....	10-3
tableau 3 : Liste des essais réalisés avec l'eau.....	Annexe I-1
tableau 4 : Liste des essais réalisés avec la pâte de tomate.....	Annexe I-2

Nomenclature

A	Aire de section (m^2)
C	Constante d'intégration
D	Diamètre (m)
F	Force (N)
K	Viscosité initiale du modèle de loi de puissance (Pa.s)
L	Longueur (m)
P	Pression (Pa)
R	Rayon (m)
V	Vitesse (m/s)
\bar{V}	Vitesse moyenne
e	Erreur sur le calcul des nombre adimensionnels
n	Index de viscosité du modèle de loi de puissance
r	Position radiale (m)
t	Temps (s)
u, v, w	Vitesse selon x, y et z (m/s)
x, y, z	Position dans l'espace (m)
Γ	Couple (N.m)
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement (s^{-1})
$\bar{\dot{\gamma}}$	Taux de cisaillement moyen (s^{-1})
$\overset{=}{\dot{\gamma}}$	Tenseur de taux de cisaillement (s^{-1})
μ	Viscosité (Pa.s)
$\bar{\mu}$	Viscosité moyenne (Pa.s)
ρ	Densité (kg/m^3)
τ	Contrainte de cisaillement (Pa)
τ_0	Seuil de cisaillement (Pa)
Bm	Nombre de Bingham (peut aussi être représenté par Bi)
\bar{Bm}	Nombre de Bingham moyen
Re	Nombre de Reynolds
\bar{Re}	Nombre de Reynolds moyen
AlSS	Aluminium semi-solide
Al	Aluminium
ASTM	American Society for Testing and Materials

CTA	Centre des technologies de l'aluminium
Fe	Fer
fs	Fraction solide
IMI	Institut des matériaux industriels
O	Oxygene
SEED	Swirl Enthalpy Equilibration Device
Si	Silicium
Sn	Étain
Mg	Magnésium
MHD	Agitation maghétodynamique
Pb	Plomb
Ti	Titane
<i>Al</i>	Indice Aluminium
<i>Tom</i>	Indice Tomate

1. INTRODUCTION

L'industrie manufacturière est toujours à la recherche de nouveaux moyens de production performants. Pour fabriquer des pièces en aluminium, l'avènement du moulage sous pression a permis de créer des pièces à la géométrie complexe avec de très hautes cadences de production. Ce procédé possède toutefois quelques limites quant aux propriétés mécaniques et à l'application de ces pièces sous contrainte. L'utilisation d'aluminium semi-solide (AlSS) au lieu de l'aluminium liquide pourra fournir plusieurs avantages au développement de cette technologie. Le moulage de pièces en AlSS est toutefois beaucoup plus délicat qu'avec de l'aluminium liquide, surtout durant la phase de remplissage du moule. Des outils de modélisation pour le moulage de l'aluminium liquide sont disponibles et leur performance a été éprouvée durant plusieurs années. La migration vers des outils de modélisation pour l'AlSS ne s'annonce pas être une simple tâche.

1.1. Problématique

À ce jour, le niveau de connaissances dans la modélisation de l'AlSS est encore limité. Lors de travaux antérieurs de développement d'alliages pour l'AlSS, un moule comportant quatre éprouvettes de traction ASTM a été développé. Les simulations réalisées chez Alu-Suisse sur ce moule ont alors suggéré un bon

remplissage et une bonne solidification de la pièce. Toutefois, ces simulations ont été réalisées avec des méthodes validées sur des moules pour de l'aluminium liquide. Il s'est avéré que les pièces moulées comportaient plusieurs défauts. Plusieurs de ceux-ci étaient causés par la géométrie du moule et auraient dû être perçus lors des simulations numériques. Il est alors apparu évident que les outils et les méthodes utilisés n'étaient pas adaptés à l'AISS.

1.2. Objectifs

Le présent travail a comme principal objectif de valider les outils de modélisation de l'écoulement de l'aluminium semi-solide dans le moulage sous pression. Plus généralement, la qualité de la reproduction de l'écoulement d'un fluide à deux phases par un modèle mathématique à une phase sera étudiée. Ceci fournira un point de départ pour l'utilisation des outils de modélisation à une phase dans l'optimisation du remplissage de moules. La modélisation physique avec un fluide analogue et la modélisation numérique avec ProCAST seront mises à l'essai. Leurs forces et faiblesses seront mises en évidence.

Il faudra pour cela, trouver un fluide analogue à l'AISS basé sur des considérations théoriques et pratiques. Ce fluide sera utilisé dans une série d'expérimentations de modélisation physique et les patrons d'écoulement observés seront corrélés avec

les caractéristiques des pièces en AlSS. Ces essais expérimentaux seront reproduits dans ProCAST à l'aide d'un modèle d'écoulement pour le fluide analogue afin de valider la solution à une phase isotherme. Ensuite, un modèle adapté à la viscosité de l'AlSS sera mis en oeuvre dans le même calcul numérique pour simuler le remplissage de la pièce avec de l'AlSS. Les résultats de cette modélisation numérique seront comparés avec une série d'essais expérimentaux de remplissage interrompu et avec les défauts métallurgiques rencontrés dans les pièces en AlSS. Il sera ainsi possible d'obtenir la validation finale de la solution fournie par ProCAST. Des recommandations pourront alors être formulées sur la conception du moule ASTM.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Le concept de mouler des pièces avec du métal à une température entre le liquidus et le solidus origine des travaux de Spencer [1]. Au cours d'expériences de solidification dans un rhéomètre, il s'est rendu compte que la viscosité du fluide changeait selon le cisaillement produit par l'appareil. Le comportement non-newtonien des métaux semi-solides a alors été découvert et a commencé à être étudié et exploité.

2.1. Principe de la mise en forme des alliages semi-solides

Un métal liquide a une faible viscosité tandis qu'à l'état solide, sa viscosité est infinie. Entre les deux, il y a une plage de viscosité qui permet d'obtenir des pièces de qualité supérieure lors du moulage. Avec la technologie conventionnelle, cette plage n'est pas utilisable puisque la solidification dendritique crée très rapidement un réseau cohérent dans la matrice en refroidissement. Le principe de la mise en forme des alliages semi-solides est donc d'obtenir une matière première à une température contrôlée avec une morphologie de grains sphéroïdale. Celle-ci est habituellement obtenue par agitation mécanique, ce qui brise les dendrites lors de leur formation. Il se forme alors une pâte qui peut être injectée dans une presse de moulage. La rhéologie, la mise en forme, les propriétés mécaniques et la

modélisation ont été le sujet de plusieurs revues d'importance couvrant l'ensemble du sujet à leur date de publication [2-6].

2.2. Avantages de l'utilisation de métaux semi-solides

L'utilisation de l'AlSS dans le moulage sous pression comporte plusieurs avantages, par rapport à l'utilisation d'aluminium liquide, qui justifient l'effort supplémentaire dans la conception et le contrôle du procédé. Les pièces fabriquées en AlSS ont un niveau de porosité moindre et des propriétés mécaniques supérieures tandis que la cadence de production élevée peut être conservée.

2.2.1. Écoulement et faible porosité

La grande viscosité de l'AlSS résout un problème majeur des pièces moulées sous pression : la porosité. L'utilisation de l'aluminium liquide engendre presque inévitablement une grande quantité de porosité. L'écoulement à haute vitesse et faible viscosité est très turbulent durant le remplissage. Il s'ensuit un front d'écoulement brisé et chaotique. Ceci emprisonne des bulles d'air dans le liquide. Ces dernières sont des faiblesses dans la structure des pièces solidifiées.

Lors du remplissage avec les métaux semi-solides, la grande viscosité permet de maintenir un front d'écoulement cohérent. Il ne peut alors y avoir

d'emprisonnement d'air [7]. Gabathuler et al. ont mesuré des diminutions de densité lors du moulage de moins de 1%, alors que l'utilisation d'aluminium liquide diminue la densité jusqu'à 3% [8]. La diminution de densité est un signe de la présence de porosités.

2.2.2. Propriétés mécaniques

Les pièces formées avec de l'AlSS ont de meilleures propriétés mécaniques que celles formées à l'aide d'aluminium liquide. L'absence de porosité est la principale raison de l'amélioration des propriétés des pièces. Les propriétés mécaniques obtenues directement lors de la coulée sont bien supérieures à celles du moulage sous pression conventionnel (figure 1).

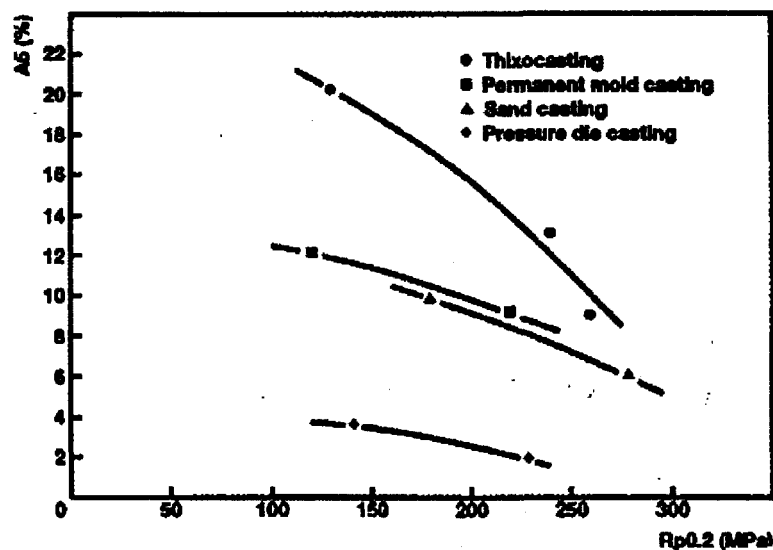


figure 1 : Limite élastique vs allongement à la rupture pour diverses méthodes de production, AlSi7Mg0.3 [8]

De plus, il est possible d'appliquer des traitements thermiques sur les pièces formées sans qu'il n'y ait apparition de cloques. Les propriétés mécaniques statiques sont alors presque équivalentes à celles habituellement obtenues en moulage avec des moules permanents[9, 10]. La résistance en fatigue [11] et la résistance à la corrosion [12] sont aussi meilleures dans le cas de pièces fabriquées avec de l'AlSS.

2.2.3. Cadence de production

Un autre avantage de l'utilisation d'alliages semi-solides est la grande cadence de production. Il est possible d'utiliser le procédé de moulage sous pression, dont la cadence est très élevée, pour fabriquer des pièces qui auparavant nécessitaient l'utilisation du moulage en moule permanent. De plus, en comparaison au moulage sous pression liquide, le temps de solidification dans la presse est moindre [13], ce qui permet d'accélérer cette étape critique de la production. Il est aussi possible d'utiliser des alliages de corroyage semi-solides dans le moulage sous pression [14, 15].

Les avantages de l'utilisation de l'aluminium semi-solide permettent de pallier au principal désavantage du moulage sous pression, les propriétés mécaniques des pièces. Il est alors possible de modifier certains paradigmes de conception et de

fabrication. Des pièces en acier peuvent être remplacées par des pièces en AlSS plus légères. Des pièces forgées ou fabriquées dans des moules permanents à coûts élevés peuvent maintenant être moulées sous pression, à haute cadence et à faible coût unitaire. Il s'ensuit un plus grand domaine disponible pour les pièces fabriquées par moulage sous pression.

2.3. Préparation de l'aluminium semi-solide

Il existe plusieurs voies pour préparer l'aluminium destiné à fabriquer des pièces en AlSS. Celles-ci se divisent en deux catégories : le thixomoulage et le rhéomoulage. Le thixomoulage comprend préalablement une étape de préparation et de solidification du lopin spécialisé. Ce lopin est ensuite réchauffé au site de moulage avant d'être injecté. Dans le rhéomoulage, les étapes de préparation et d'injection se suivent immédiatement, sans qu'il n'y ait de solidification complète, de manipulation ou de transport du lopin spécialisé. Le rhéomoulage comporte donc des avantages de coûts sur la matière première et le transport, et il permet la réutilisation des rejets de moulage. Quelques procédés pour produire de l'AlSS par rhéomoulage sont expliqués ici. Chaque procédé produit une microstructure qui est différente, avec certains avantages et inconvénients par rapports aux autres [16].

2.3.1. Procédé SEED

Le procédé utilisé dans ce travail pour produire de l'AlSS est le procédé intitulé Swirl Enthalpy Equilibration Device (SEED) [17]. C'est un procédé breveté par Alcan Inc. qui consiste à agiter mécaniquement un lopin d'aluminium liquide lors de son refroidissement. Cette agitation est créée par un mouvement de rotation décentrée. La phase d'agitation est suivie d'une phase de drainage, où le liquide encore présent dans la billette est retiré par percolation (figure 2). La microstructure obtenue par SEED est globulaire et fine (figure 3).

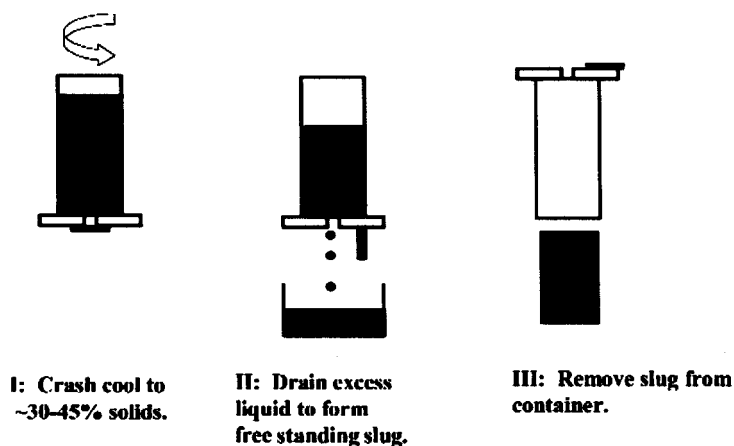


figure 2 : Schématisation de la fabrication de lopins de AlSS SEED [17]

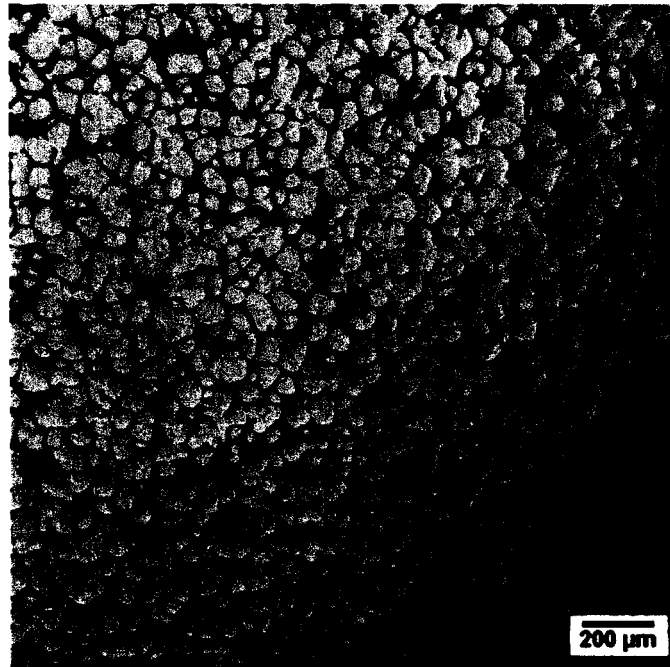


figure 3 : Microstructure typique obtenue par SEED [17]

Il s'ensuit un lopin à haute teneur en fraction solide qui est injecté dans la presse pour former des pièces.

2.3.2. Autres méthodes

Voici quelques autres méthodes pour fabriquer des lopins d'AlSS prêts à l'injection. Le Massachusetts Institute of Technology et UBE Industries Ltd. ont tous deux breveté des méthodes pour faire du rhéomoulage. La technique la plus populaire pour préparer des lopins pour le thixomoulage est l'agitation magnétohydrodynamique.

Procédé développé au MIT

Le Massachusetts Institute of Technology a breveté son propre procédé qui consiste à initier la germination et à coalescer ces germes. La technique consiste à insérer une tige refroidie en rotation dans l'aluminium liquide au début de la solidification. Cette tige froide crée l'apparition de plusieurs germes qui sont dispersés par l'agitation. Par la suite, la tige est retirée et les germes coalescent en globules sphériques (figure 4 et figure 5).

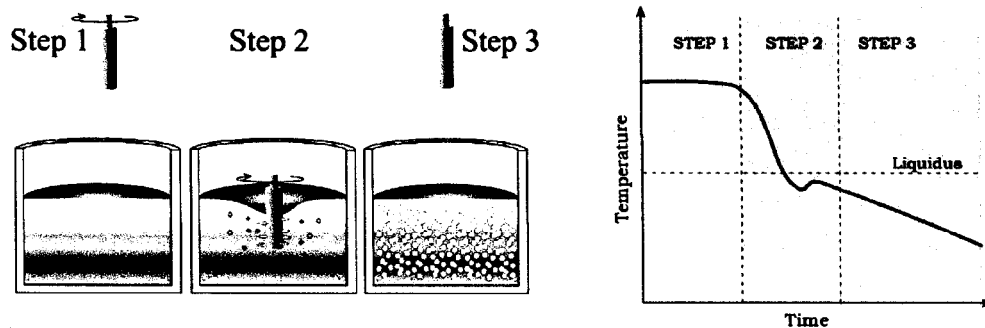


figure 4 : Schématisation du procédé du MIT [18]

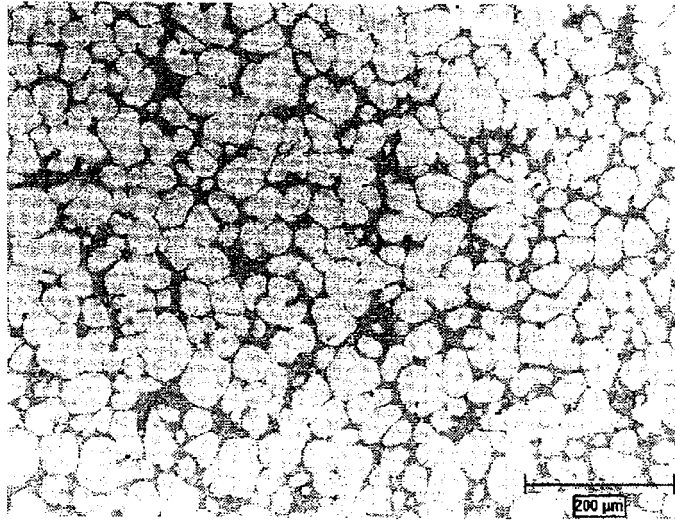


figure 5 : Microstructure typique obtenue par MIT [13]

Procédé de UBE Industries Ltd.

UBE Industries Ltd. a introduit un procédé différent des autres en cela qu'il n'utilise pas d'agitation mécanique (figure 6). L'aluminium liquide est refroidi à une température où la germination de grains est abondante. Une variante de ce procédé fait couler le métal liquide sur une plaque refroidie lors de l'introduction dans le creuset. Cela favorise la germination et la dispersion des germes. Par la suite, la température du métal dans le creuset est remontée légèrement pour former des grains globulaires par croissance et coalescence (figure 7). C'est un procédé très simple au niveau de l'opération.

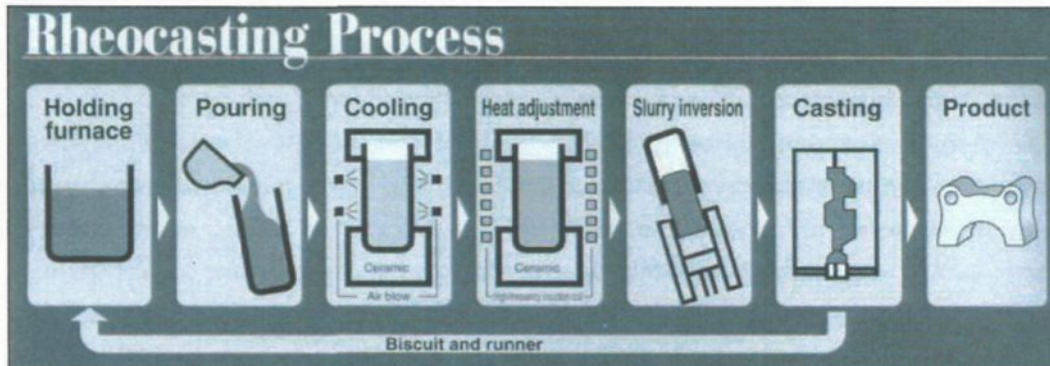


figure 6 : Schématisation du procédé UBE [19]



figure 7 : Microstructure typique obtenue par UBE [16]

Agitation magnétohydrodynamique

La méthode originale pour produire des lopins pour le thixomoulage est l'agitation magnétohydrodynamique (MHD). Il s'agit d'insérer le lopin en refroidissement dans un champ magnétique d'agitation. Ainsi, les dendrites sont brisées alors qu'ils se forment. Cependant, cette technique cause l'emprisonnement de liquide dans les globules solides (figure 8).



figure 8 : Microstructure typique obtenue par MHD [16]

Cela réduit la fraction solide effective et ne donne pas d'aussi bons résultats que les trois autres techniques mentionnées précédemment [20]. Le lopin ainsi spécialement préparé est vendu aux industries de mise en forme qui le réchauffent à la bonne fraction solide juste avant l'injection.

2.4. Modélisation de l'écoulement des métaux semi-solides

Plusieurs articles décrivent le comportement de l'AISS. Ils abordent les éléments mathématiques nécessaires à l'expression de la viscosité de ces fluides complexes qui servent ensuite de base à des simulations numériques. Plus rarement, ces simulations ont été combinées avec des expériences de modélisation physique.

2.4.1. Modélisation numérique

La modélisation numérique consiste à simuler sur un ordinateur le comportement du fluide à partir de sa description mathématique. La viscosité des métaux semi-

solides peut être simplement exprimée dans un modèle de loi de puissance. Il convient d'exprimer ce modèle sur l'ensemble de la plage de solidification de l'alliage [21]. Malgré sa simplicité, des simulations utilisant ce modèle ont déjà été mises en oeuvre avec succès pour reproduire l'écoulement de l'aluminium semi-solide dans les travaux de Paradies et Orgeas [22, 23]. Ceux-ci ont recréé les comportements de remplissage en coque, en monticule et en disque qu'ils avaient observés expérimentalement.

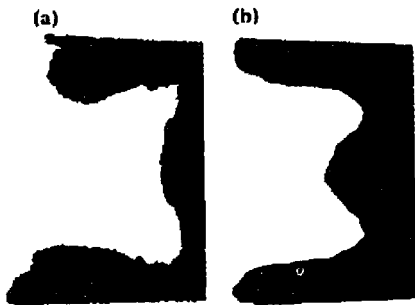


figure 9 : a) Remplissage partiel de A356 à 7.8 m/s, b) simulation correspondante [23]

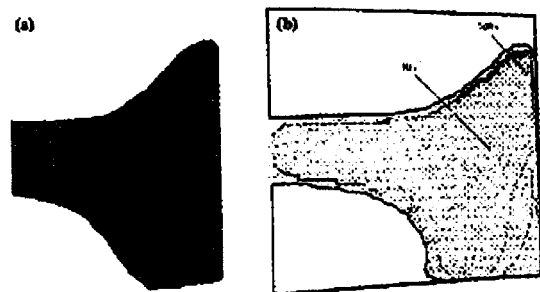


figure 10 : a) Remplissage partiel de A356 à 2.0 m/s, b) simulation correspondante [23]

Les figure 9 et figure 10 montrent deux patrons d'injections simulés avec succès. La seule différence entre les deux figures est la vitesse d'injection qui est environ quatre fois plus petite dans la figure 10. Cette différence change le régime de l'écoulement et cette modification est bien reprise par le modèle mathématique.

La modélisation des surfaces libres de métal semi-solide ou des régions faiblement déformées peut être améliorée par l'utilisation du seuil de cisaillement. Les valeurs

de cette propriété ont été explorées par plusieurs expérimentateurs dont Pan pour le cas des alliages semi-solides d'aluminium et de silicium [24]. Le cas de l'alliage A356 est présenté à la figure 11. L'inclusion de cette variable permet d'exprimer une plus grande plage de comportements [25].

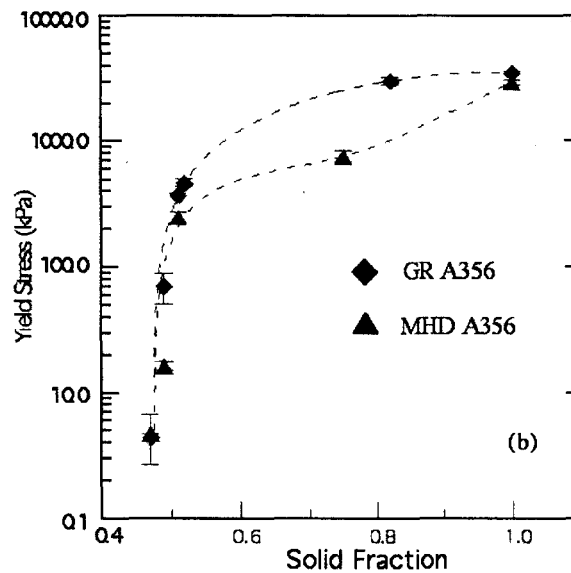


figure 11 : Seuil de cisaillement en fonction de la fraction solide pour l'alliage A356 [24]

Pour représenter l'évolution dans le temps de la viscosité du métal semi-solide, il convient de modéliser l'évolution de la structure interne. Ceci est réalisé par le biais d'un paramètre de structure. C'est ainsi que procède Alexandrou et al. [26, 27] en se basant sur un modèle précédemment développé par Papanastasiou [28]. Une approche similaire a aussi été utilisée par Kumar et al. [29].

Au-delà de cette approche, il est possible de construire un modèle pouvant tenir compte des deux phases présentes dans l'écoulement de l'aluminium semi-solide [21, 30, 31]. Ces modèles sont toujours en développement et ils nécessitent une grande capacité de calcul. Ils permettent toutefois de simuler la ségrégation de la fraction solide due à l'écoulement.

2.4.2. Modélisation physique

La modélisation physique permet de faire des expériences dans des conditions plus aisées que dans les conditions industrielles. Elle utilise des fluides analogues ou des conditions expérimentales simplifiées. Elle est très utile pour accumuler des données sur le comportement de l'écoulement ou pour valider des modèles mathématiques.

L'utilisation d'un fluide analogue consiste à prendre une substance de remplacement pour le métal semi-solide. Ceci permet de faire rapidement des séquences d'essais à la température ambiante sans s'encombrer des difficultés inhérentes à l'utilisation des métaux liquides. Différents fluides ont déjà été utilisés pour modéliser l'AISS : une suspension de carbonate de calcium dans l'huile, un gel ultrasonique, de la pâte de tomate, du sirop de chocolat. L'utilisation de ces

fluides a permis à Koke et al. [32] de reproduire expérimentalement les différents patrons d'écoulement observés et simulés par Paradies (figure 12.)

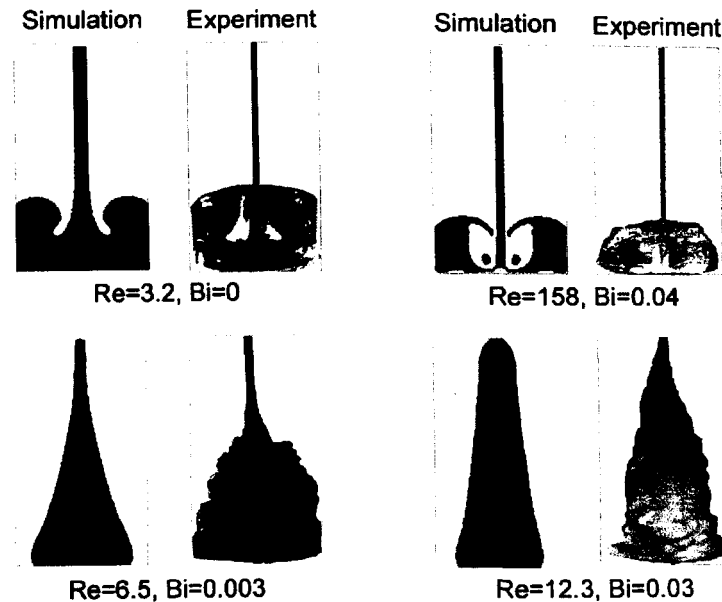


figure 12 : Résultats expérimentaux utilisant divers fluides analogues (droite); et simulations correspondantes (gauche) [32]

Un autre candidat de choix comme fluide analogue est la peinture. Celle-ci possède des propriétés thixotropiques qui ont été étudiées par l'industrie concernée. Ceci a suggéré à Lee et al. son utilisation dans des expériences de modélisation physique [33]. Il a injecté de la peinture dans un moule possédant des obstacles à contourner (figure 13). Cette configuration géométrique met en évidence le comportement rhéologique du fluide. Suite à la caractérisation du fluide, il a pu simuler l'écoulement par un modèle mathématique (figure 14).

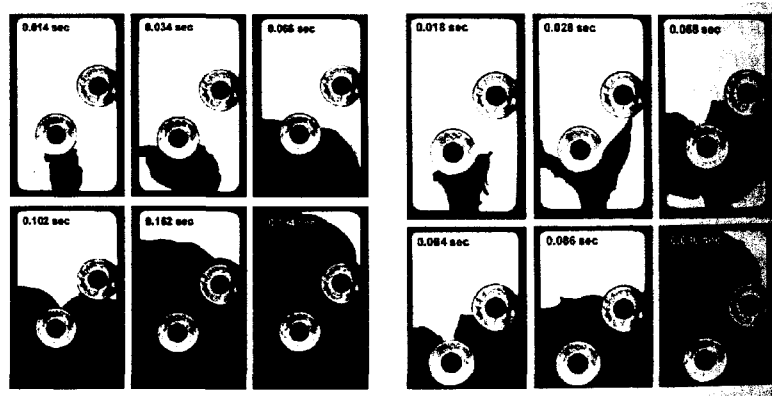


figure 13 : Résultats expérimentaux d'injection de peinture dans un moule avec obstacles; vitesse d'injection de 5m/s (gauche) et 8 m/s (droite) [33]

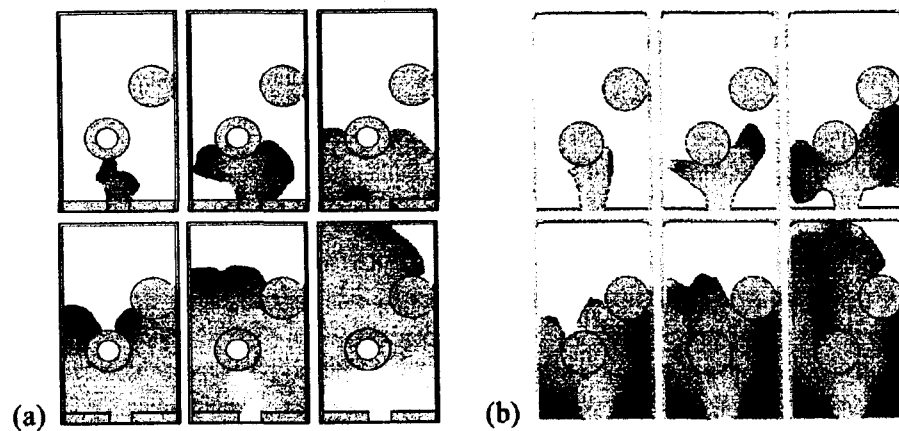


figure 14 : Résultats de simulations correspondant à la figure 13; vitesse d'injection de a) 5 m/s et b) 8 m/s [33]

Récemment, Modigell et al. ont réalisé la visualisation de l'écoulement d'un alliage plomb-étain semi-solide dans un moule [34]. La géométrie du moule est simple, principalement bidimensionnelle et un côté est recouvert de verre pour permettre la visualisation. Cela leur permet de comparer avec les résultats de modélisation mathématique.

3. THÉORIE

Les écoulements engendrés par des fluides non-newtoniens comme l'aluminium semi-solide sont très complexes. Les propriétés spécifiques affectant la valeur de la viscosité doivent être comprises pour pouvoir étudier les phénomènes régissant l'écoulement. Cette section présente les différents paramètres affectant la viscosité des métaux semi-solides, les modèles mathématiques exprimant ces dépendances, le modèle choisis pour représenter l'aluminium semi-solide dans ce travail ainsi que certaines considérations théoriques pertinentes sur les écoulements non-newtoniens.

3.1. Rhéologie des métaux semi-solide

Les principaux avantages d'utiliser un métal semi-solide résident dans ses propriétés rhéologiques. Pour exploiter au maximum ces avantages il faut donc connaître en détail le comportement du fluide. La viscosité est dépendante de la fraction solide, de la morphologie, du taux de cisaillement et du temps. Les premières expérimentations ont été menées dans laboratoires du MIT sur un alliage Sn-15%Pb. Les travaux de Turng et Wang [35], de Joly et Mehrabian [36], ainsi que ceux de Laxmanan et Flemings [37] ont caractérisé la rhéologie de cet alliage.

3.1.1. Dépendance à la fraction solide

Sur la plage de solidification de l'alliage, la viscosité varie énormément. À chaque fraction solide correspond un comportement rhéologique différent. Lorsque la fraction solide augmente, la viscosité subit un accroissement exponentiel (figure 15). On y voit qu'à partir d'une fraction solide d'environ 0.45, la viscosité augmente radicalement.

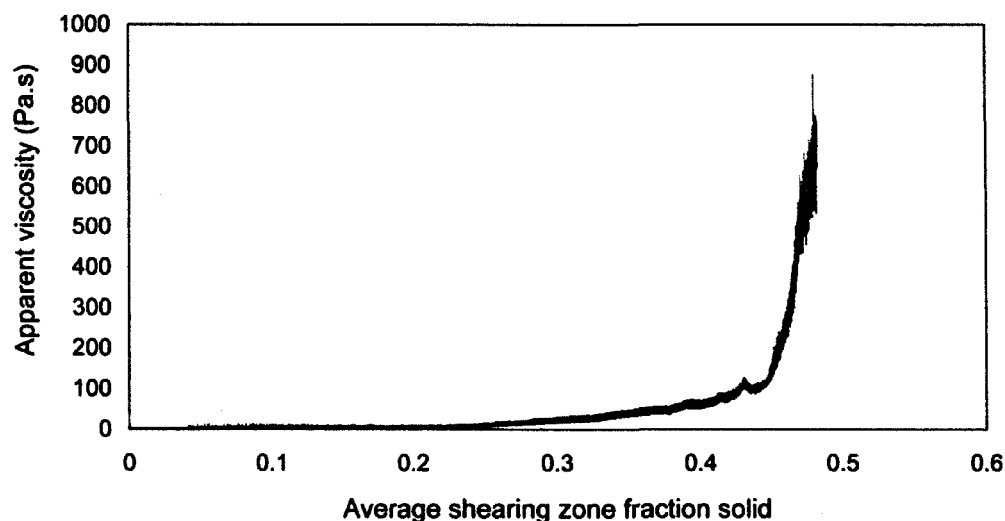


figure 15 : Évolution de la viscosité apparente de A356 pendant un refroidissement continu à un taux de cisaillement de 3.1 s^{-1} ; [38]

Pour obtenir une viscosité spécifique, il faut donc avoir un bon contrôle de la fraction solide. Le modèle de Scheil [48] exprime la relation qui existe entre la fraction solide et la température. Il s'agit d'exercer un contrôle précis sur cette dernière variable. Comme l'indique la figure 16, il existe certaines régions où les effets d'une variation de température sont plus importants que d'autres.

Fraction solide de Aluminium A356 (Scheil)

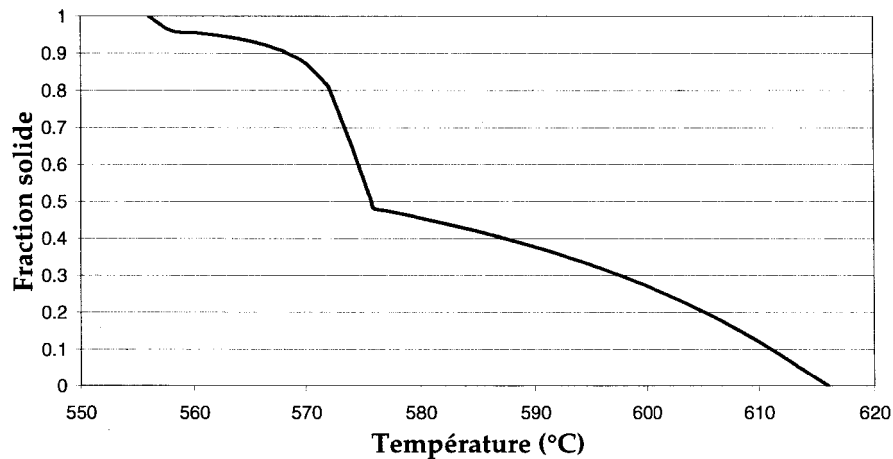


figure 16 : Fraction solide de A356 selon un modèle de Scheil [48]

Ceci peut engendrer de grands écarts au niveau de la viscosité du fluide. En combinant le modèle de Scheil pour la fraction solide avec le modèle de viscosité utilisé dans ce présent travail, il est possible de faire une relation entre la température et la viscosité. La sensibilité de la viscosité à la fraction solide est ajoutée à celle de la fraction solide à la température. Cela résulte pour l'alliage A356 à des variations très importantes de viscosité lorsque la température descend sous les 576°C (figure 17).

Viscosité de A356

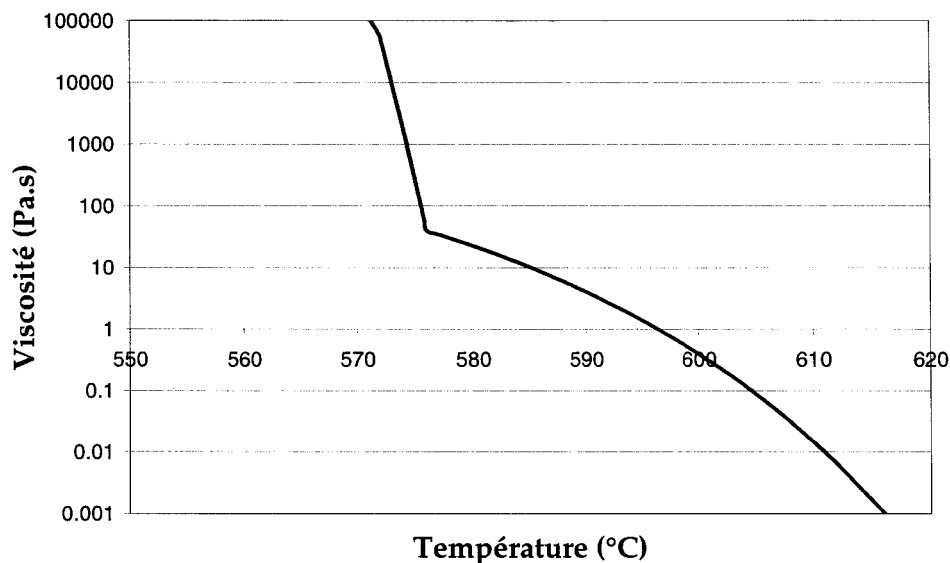


figure 17 : Relation entre la température et la viscosité de A356, à un taux de cisaillement de 1 s^{-1}

La variable température, par son impact sur la fraction solide, est donc critique au contrôle du procédé.

3.1.2. Dépendance à la morphologie

La morphologie des globules résulte principalement du procédé de préparation des lopins qui est utilisé. La solidification lente au repos produira des dendrites de larges dimensions. Ceux-ci sont très peu mobiles puisqu'ils s'agrippent les uns aux autres. Pour avoir une meilleure fluidité, il faut que le procédé produise des globules sphériques de petites dimensions. Le taux d'agitation et sa durée

détermineront le degré de globularisation. La figure 18 présente deux types de microstructure obtenus par agitation.

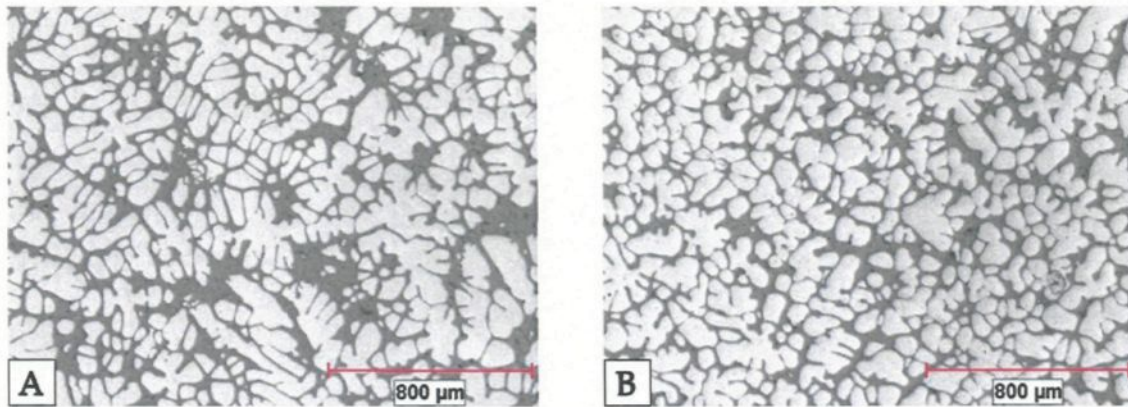


figure 18 : Microstructure en rosette (A) et globulaire (B) dans A356 produit avec le procédé SEED

Ces microstructures ont été obtenues en trempant des structures semi-solides. En A) le semi-solide a été moins agité qu'en B), ce qui a engendré une microstructure où les dendrites sont encore partiellement présentes. Il y aura donc plus de résistance à l'écoulement dans cette structure. Les travaux de Zoqui ont atteint les mêmes conclusions en variant les taux de brassage magnétohydrodynamiques [39].

3.1.3. Dépendance au taux de cisaillement

Le facteur qui permet la mise en forme des lopins à haute fraction solide est la dépendance au taux de cisaillement. Le taux de cisaillement correspond à la variation spatiale de la vitesse (équation 1).

$$\dot{\gamma} = \nabla V + (\nabla V)^T$$

équation 1

Typiquement dans les métaux semi-solides, lorsque le taux de cisaillement augmente, la viscosité chute de manière logarithmique (figure 19). Ce type de comportement s'appelle rhéofluidifiant.

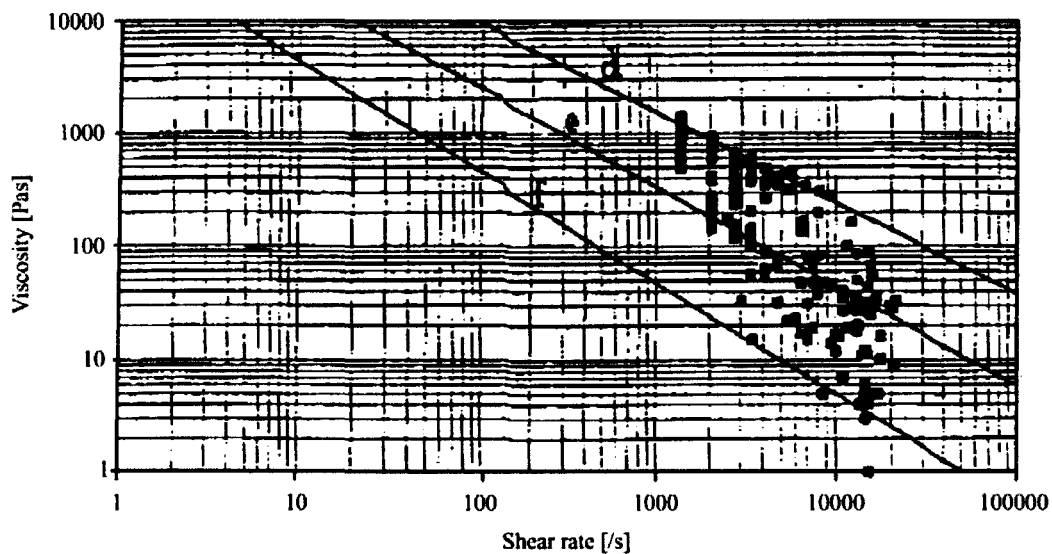


figure 19 : Viscosité de A356 à différentes fractions solides (d : 0.63, e : 0.50, f : 0.47) [40]

La dépendance au taux de cisaillement est due à l'équilibre entre le taux d'agglomération et de désagglomération des particules solides dans le fluide. À un taux de cisaillement donné, le nombre de liens entre les particules solides est constant. Lorsque le niveau d'agitation augmente, l'énergie disponible brise les liens entre les particules solides et la viscosité diminue. L'inverse se produit à la diminution de l'agitation.

3.1.4. Dépendance au temps

Il existe toutefois un temps de réaction à l'ajustement de la viscosité lors d'un changement subit de taux de cisaillement. C'est le comportement thixotropique des métaux semi-solide. La réorganisation des liens entre les particules solides ne s'effectue pas instantanément (figure 20). Lorsque le taux de cisaillement est subitement réduit (A), le torque Γ et la viscosité η augmentent rapidement, mais ils prennent jusqu'à 1200 secondes pour s'établir à une nouvelle valeur stable.

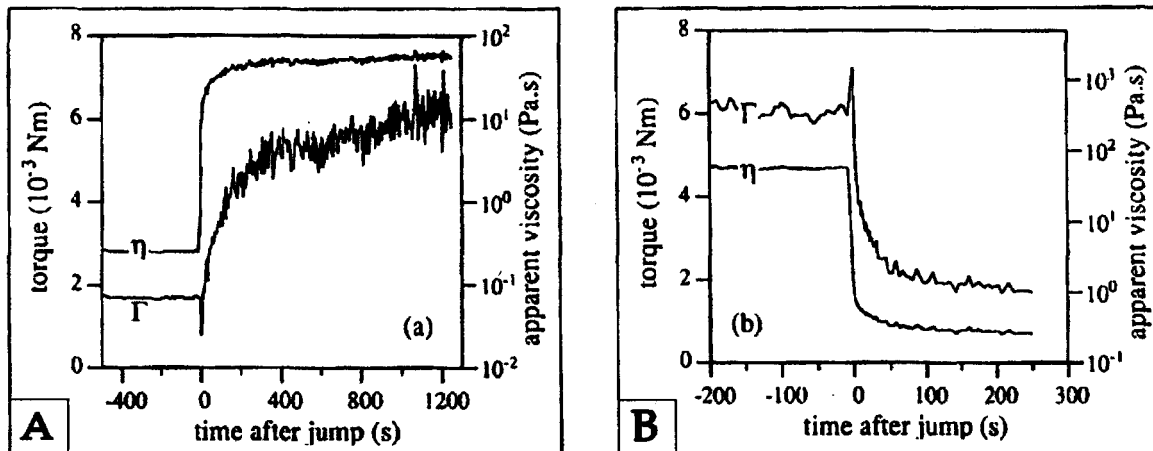


figure 20 : Thixotropie de A356, $f_s=0.30$. Au temps 0, le taux de cisaillement est passé de A) 105 à 1.7 s $^{-1}$ et B) 1.7 à 105 s $^{-1}$ [41]

Le temps de réaction mesuré par plusieurs expérimentateurs concorde avec l'ordre de grandeur [42-45]. De plus, le temps de réaction à une diminution du taux de cisaillement est plus grand que lors de l'augmentation. Cela semble être dû à la nécessité supplémentaire des particules à se rencontrer pour pouvoir former des liens.

L'ordre de grandeur du temps de réaction de l'aluminium semi-solide est incompatible avec le procédé de moulage sous pression puisque la durée de l'injection est inférieure à une seconde. Ceci signifie que les modèles de viscosité établis en régime permanent ne peuvent être utilisés. Le choix d'un modèle doit considérer cet aspect en sélectionnant des modèles expérimentaux établis en régime transitoire ou des modèles qui ont déjà été éprouvés.

3.1.5. Seuil de cisaillement

Lorsqu'il est soumis à de faibles niveaux de contrainte, l'aluminium semi-solide a un comportement élastique. La contrainte limite où la déformation plastique est initiée est appelée «seuil de cisaillement». Le seuil de cisaillement augmente avec la fraction solide pour atteindre sa valeur maximale du matériau lorsque celui-ci est complètement solide [16].

Toutes ces caractéristiques font que le comportement rhéologique de l'AlSS est très complexe. Son écoulement durant le remplissage des moules est alors une opération délicate où de petites modifications aux paramètres peuvent engendrer un comportement très différent.

3.2. Modèles mathématiques

La viscosité des métaux semi-solides est habituellement représentée par des modèles de loi de puissance ou de Herschel-Bulkley. Ce sont des modèles simples qui ont fait leurs preuves dans la reproduction des écoulements de fluides non-newtonien. La contrainte de cisaillement est toujours déterminée par le taux de cisaillement et la viscosité (équation 2).

$$\tau = -\mu\dot{\gamma}$$

équation 2

3.2.1. Modèle de loi de puissance

Le modèle de loi de puissance ne comporte que deux paramètres (équation 3).

$$\mu = K\dot{\gamma}^{(n-1)}$$

équation 3

Ceux-ci peuvent être entièrement déterminés à l'aide d'une courbe de viscosité vs taux de cisaillement pour une fraction solide donnée. Ils peuvent aussi faire l'objet d'une modélisation plus complète pour reproduire le comportement du fluide sur une plage de fractions solides [21]. Le paramètre K détermine si le fluide est très ou peu visqueux, tandis que l'exposant n est la réponse visqueuse. Lorsque $n=1$, le fluide est newtonien. Si $n>1$, la viscosité du fluide augmentera avec le taux de cisaillement (rhéoépaississant). À l'inverse, $n<1$ donne un fluide rhéofluidifiant.

C'est ce modèle qui est mis en oeuvre dans ProCAST. La particularité de ce modèle est qu'elle donne une viscosité infinie lorsque le taux de cisaillement vaut zéro.

3.2.2. Modèle de Herschel-Bulkley

L'inclusion du seuil de cisaillement dans le modèle de loi de puissance donne le modèle dénommé Herschel-Bulkley.

$$\mu = \mu_0 + K\dot{\gamma}^{(n-1)}$$

équation 4

Avec un fluide rhéofluidifiant, la valeur de μ_0 correspond à la valeur maximale de la viscosité. Cela résout le problème de viscosité infinie du modèle de loi de puissance, mais il faut déterminer une valeur de seuil de cisaillement.

3.2.3. Modèle de structure interne transitoire

Les deux modèles présentés précédemment sont des modèles instantanés. Toute variation du taux de cisaillement aura un effet instantané sur la viscosité. Pour représenter la thixotropie du fluide, il convient de modéliser l'évolution de la structure interne. Ceci est réalisé en insérant un paramètre de structure λ et en exprimant l'évolution de ce paramètre selon le temps. Par exemple, l'approche d'Alexandrou est la suivante

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + V \cdot \nabla \lambda = a(1 - \lambda) - b\lambda \left(\frac{\dot{\gamma}}{2}\right)^{1/2} \exp\left[c\left(\frac{\dot{\gamma}}{2}\right)^{1/2}\right] \quad (\text{ref. [27]})$$

équation 5

Les variables a , b et c sont des paramètres empiriques déterminant la croissance de la structure (a) et sa décroissance (b , c). Par la suite, les paramètres du modèle de Herschel-Bulkley sont déterminés selon la fraction solide et le paramètre de structure λ .

3.3. Caractérisation rhéologique de l'aluminium semi-solide

Plusieurs expérimentations ont eu pour objectif de déterminer une courbe de viscosité en fonction du taux de cisaillement pour l'aluminium semi-solide. Cependant, d'un article à l'autre les résultats varient beaucoup. À chaque valeur constante de fraction solide, l'AlSS se comporte comme un fluide de viscosité différente et de réponse rhéologique différente. De plus, les méthodes d'expérimentation diffèrent et chacune d'elles affecte différemment la structure du fluide et donne donc des résultats différents. La figure 21 présente les résultats de trois expérimentateurs.

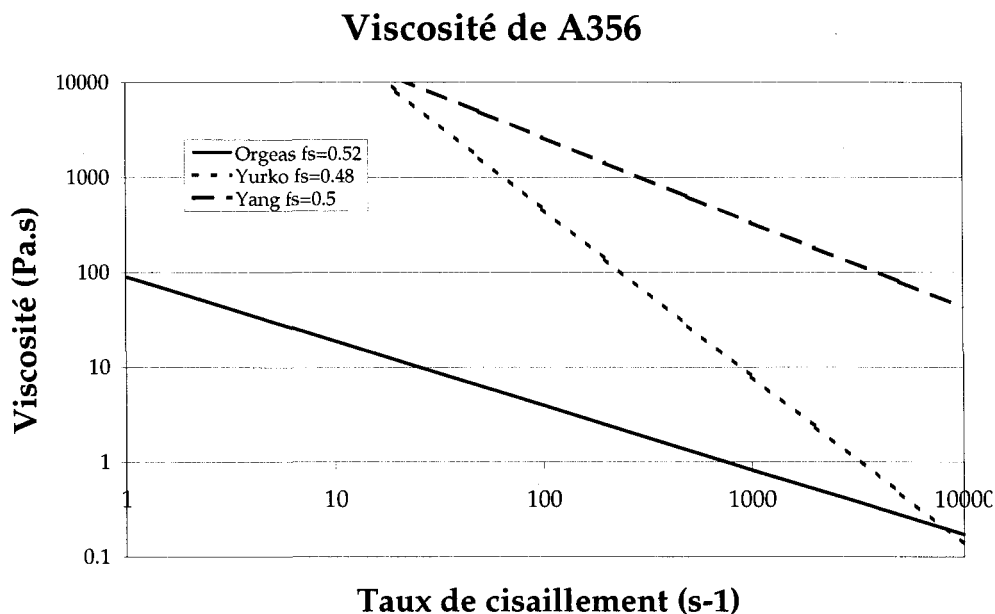


figure 21 : Viscosité de A356 tel qu'observée par différents expérimentateurs [20, 22, 40]

Les données pour la courbe d'Orgéas ont été tirées de son article de modélisation [22]. Les données de Yurko ont été obtenues expérimentalement sur une presse de compression dynamique [20]. Yang a aussi réalisé des expériences dans le domaine transitoire avec une presse d'injection [40]. Une autre bonne référence sur la viscosité de A356 est le travail de Brabazon et al. [38], mais la fraction solide de ses expérimentations ne dépasse pas 0.33. Une analyse des raisons expérimentales des différences entre les résultats est présentée par Koke [46].

Dans le présent travail, la réponse visqueuse de l'AlSS est exprimée au moyen d'un modèle de loi de puissance. Les paramètres du modèle ont été déterminés pour la

plage complète de fractions solides à partir des travaux d'Orgéas. La relation entre la température et la fraction solide suit le modèle de Scheil pour un alliage Al-6%Si-0.3%Mg (figure 22).

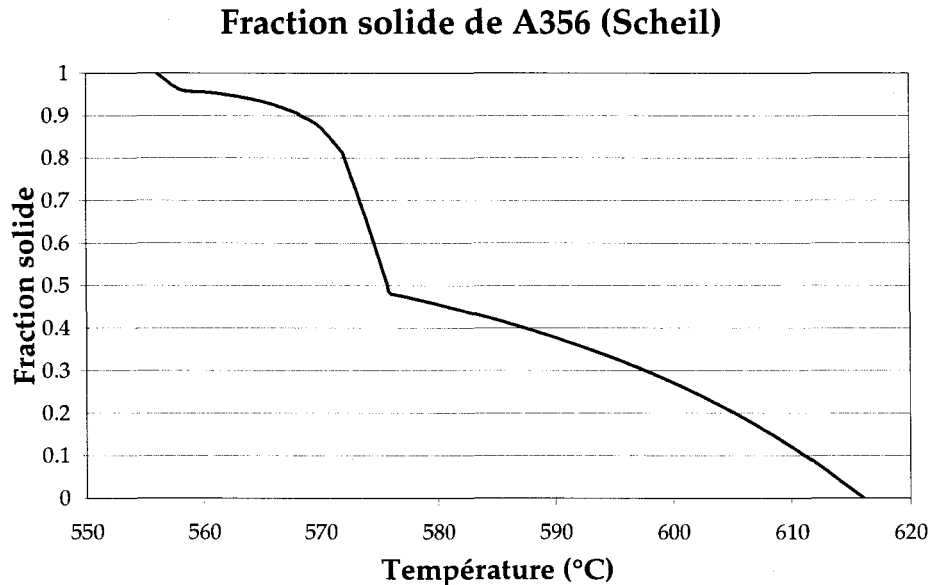


figure 22 : Fraction solide de l'A356 en fonction de la température (Scheil)

Cette courbe ne représente pas exactement le procédé SEED puisque l'opération de drainage n'est pas prise en compte. Dépendamment de la quantité drainée, la courbe est déplacée de quelques degrés Celsius vers la droite. Cela ne représente pas d'inconvénients pour les simulations puisque le modèle est isotherme. Les figure 23 et figure 24 montrent le comportement du fluide en fonction du taux de cisaillement pour trois fractions solides dans la plage de formage.

Courbe de déformation du modèle utilisé pour l'AISS

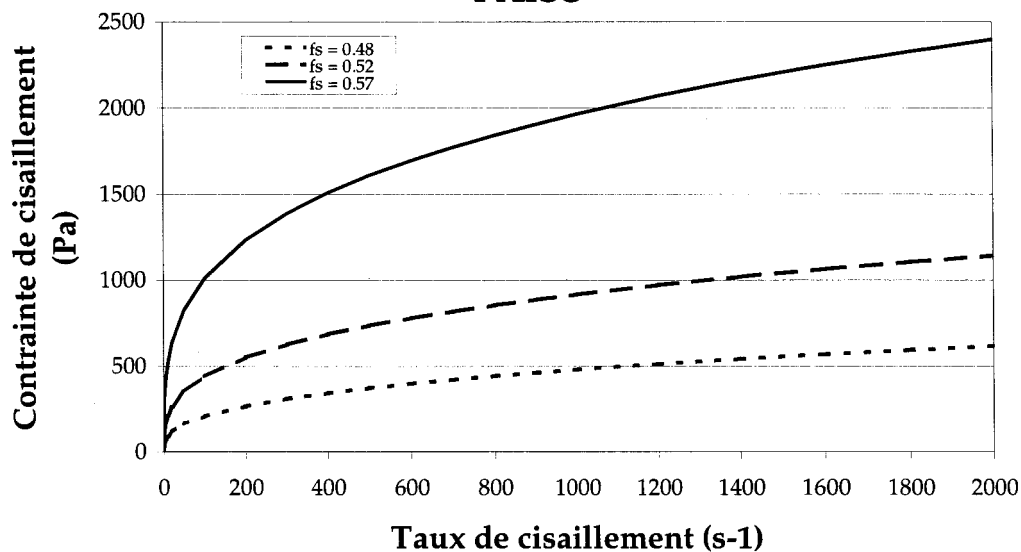


figure 23 : Courbe de déformation utilisée pour l'AISS; contrainte de cisaillement

Courbe de déformation du modèle utilisé pour l'AISS

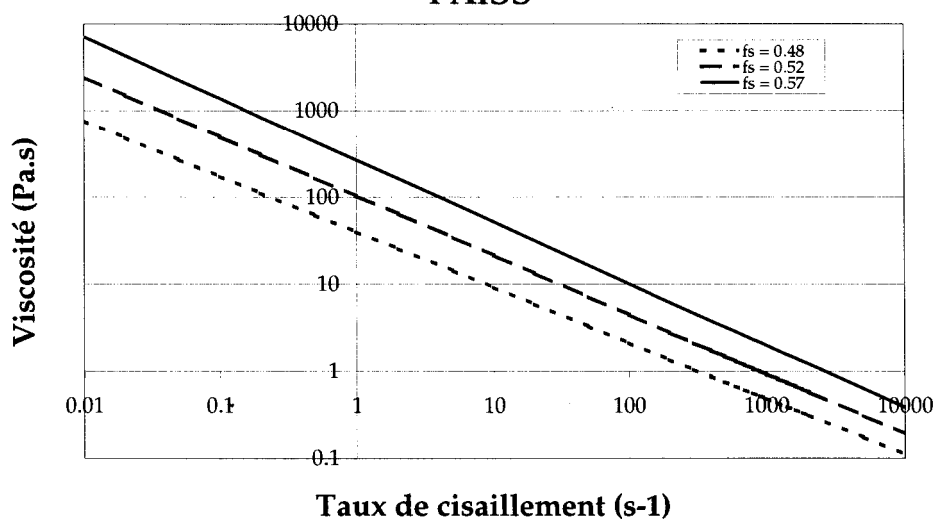


figure 24 : Courbe de déformation utilisée pour l'AISS; viscosité

Il est à noter que la réponse visqueuse utilisée s'éloigne considérablement des données expérimentales établies dans des expériences en régime permanent. Celle-ci a été établie à partir de données transitoires qui sont plus représentatives des phénomènes présents lors de l'injection dans un moule.

3.4. Profils de vitesse dans un tube

Les profils de vitesse dans un écoulement cylindrique ont été étudiés depuis longtemps et sont très bien définis. Il est intéressant de comparer les profils de vitesses dans des conditions identiques selon que le fluide est newtonien ou non-newtonien.

3.4.1. Newtonien

L'écoulement de type Hagen-Poiseuille est très connu. La vitesse locale est déterminée selon le gradient de pression et la position radiale.

$$V = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} (R^2 - r^2)$$

équation 6

Cette relation peut être dérivée à partir des conditions limites à la paroi et des équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement [47]. Le taux de cisaillement est la dérivée locale de la vitesse et la viscosité est constante. Le profil de vitesse obtenu est tracé à la figure 25. La position radiale, du centre

jusqu'à la paroi est tracée en abscisse, tandis que les valeurs normalisées de la vitesse et du taux de cisaillement ont été portées en ordonnée.

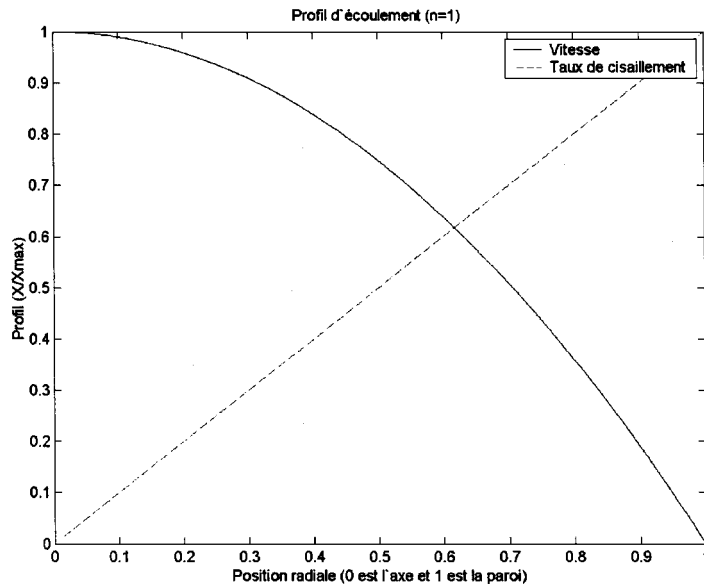


figure 25 : Profil de vitesse newtonien

Le profil de vitesse est une parabole tandis que le profil de taux de cisaillement est une droite.

3.4.2. Non-newtonien

Lorsque le fluide n'est pas newtonien, une variable additionnelle s'ajoute : la viscosité. En modélisant celle-ci par une loi de puissance, elle s'exprime en fonction du taux de cisaillement. Dans un fluide rhéofluidifiant, on peut s'attendre à ce qu'elle ait une valeur infinie au centre de l'écoulement et une valeur minimale à la paroi.

Cette variation de la viscosité locale affecte la distribution de la vitesse. Le profil de vitesse peut être déterminé de la même manière que dans le cas newtonien.

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \frac{dP}{dx} r &= \tau \\ K \dot{\gamma}^n &= \tau \\ \dot{\gamma} &= - \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} r \right)^{\frac{1}{n}}\end{aligned}$$

équation 7

Dans un écoulement pleinement développé dans un tube, la seule variation de vitesse, et donc de déformation en cisaillement, se produit selon le rayon.

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dr}$$

équation 8

Il suffit d'intégrer le taux de cisaillement local pour avoir la vitesse. La constante d'intégration est déterminée par la condition de non glissement à la paroi.

$$\frac{dV}{dr} = - \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} r \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$V = - \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{n+1}{n}} + C$$

$$V|_{r=R} = 0 \quad \therefore \quad C = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}}$$

$$V = \left(\frac{R}{2K} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{Rn}{n+1} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right)$$

équation 9

Ce profil de vitesse non-newtonien dépend de l'exposant n de la réponse visqueuse. Une valeur de $n=0.33$ représente l'AISS à une fraction solide d'environ 0.50. Ceci permet de visualiser le profil de vitesse et le taux de cisaillement dans la figure 26.

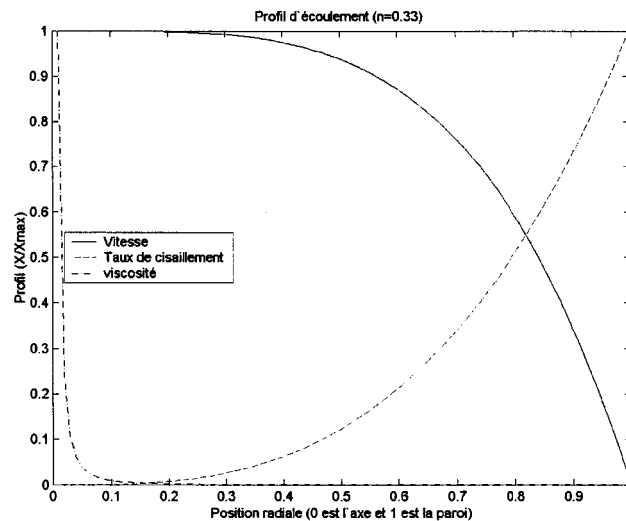


figure 26 : Profil de vitesse, de taux de cisaillement et de viscosité dans un écoulement non-newtonien

Le profil de vitesse est plus plat que dans le cas newtonien et le taux de cisaillement croît exponentiellement alors qu'il se rapproche de la paroi. La viscosité suit une décroissance inverse à la croissance du taux de cisaillement. Ceci fait en sorte qu'il existe une région au centre de l'écoulement où la viscosité est très élevée. À l'intérieur de cette région, les variations radiales de vitesse sont minimales. Le fluide se comporte à cet endroit comme un bloc pratiquement solide. Ceci est communément appelé un écoulement piston ou un écoulement de Stokes.

3.5. Nombres adimensionnels

Un écoulement peut généralement être caractérisé par un ou plusieurs nombres adimensionnels. Ceux-ci expriment les rapports des différentes forces qui sont en jeu. L'établissement des nombres adimensionnels s'effectue à partir de certaines propriétés du fluide et variables représentatives de l'écoulement. Dans les écoulements d'aluminium semi-solide, les nombres adimensionnels importants sont le nombre de Reynolds et le nombre de Bingham. La formulation de ces nombres adimensionnels utilisée couramment dans la littérature au sujet des métaux semi-solides comporte une simplification majeure. L'opinion de l'auteur est que cette simplification n'est pas justifiée et qu'une formulation plus précise existe et est disponible. Cette section décrit le développement mathématique nécessaire pour établir la formulation des nombres adimensionnels utilisée dans ce travail.

3.5.1. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds (Re) est le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses. Une valeur faible de Re démontre un écoulement laminaire tandis que de la turbulence commence à apparaître à des valeurs au-dessus de 2500-3500.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

équation 10

Dans un écoulement cylindrique, la vitesse et la longueur caractéristiques sont la vitesse moyenne et le diamètre respectivement. Le profil de Re est donc identique au profil de vitesse dans un fluide newtonien. Pour un écoulement de fluide non-newtonien, la définition de la viscosité pose un problème.

Celle-ci est définie selon la valeur du taux de cisaillement moyen dans un modèle de loi de puissance. Le taux de cisaillement moyen est estimé à l'aide de la vitesse caractéristique et de la longueur caractéristique. Le nombre de Reynolds moyen pour l'écoulement non-newtonien peut alors être exprimé.

$$\begin{aligned}\overline{\text{Re}} &= \frac{\rho \overline{V} D}{\overline{\mu}} \\ \overline{\mu} &= K \overline{\dot{\gamma}}^{n-1} \\ \overline{\dot{\gamma}} &= \frac{\overline{V}}{D} \\ \overline{\mu} &= K \overline{V}^{n-1} D^{1-n} \\ \overline{\text{Re}} &= \frac{\rho \overline{V}^{2-n} D^n}{K}\end{aligned}$$

équation 11

Ceci est la formulation classique utilisée dans les publications sur les métaux non-newtoniens. Il est toutefois possible que cette formulation ne soit pas représentative de l'écoulement. Les valeurs moyennes utilisées ne sont pas caractéristiques. L'écoulement est divisé en deux parties. Au centre, l'écoulement est relativement calme tandis que les taux de cisaillement sont très importants près de la paroi. Ce phénomène est plus frappant au fur et à mesure que l'exposant n s'éloigne de 1.

Les valeurs moyennes peuvent être mises de côté en trouvant une valeur locale pour le nombre de Reynolds. Il est alors possible d'insérer directement les expressions du taux de cisaillement et du profil de vitesse non-newtonien avec le modèle de loi de puissance (équation 3, équation 7 et équation 9).

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho V D}{\mu} \\ V &= \left(\frac{R}{2K} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{Rn}{n+1} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right) \\ \dot{\gamma} &= \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} r \right)^{\frac{1}{n}} \\ \mu &= K \left(\left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} r \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{n-1} \\ \text{Re} &= \frac{n\rho DR}{(n+1)K} \left[\frac{\left(\frac{dP}{dx} \frac{R}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n}{n+1}} \right)}{\left(\left(\frac{dP}{dx} \frac{r}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{n-1}} \right] \end{aligned}$$

équation 12

Ceci donne le profil du nombre de Reynolds en fonction du gradient axial de pression et des propriétés du fluide. La figure 27 montre le profil du nombre de Reynolds dans un fluide non-newtonien.

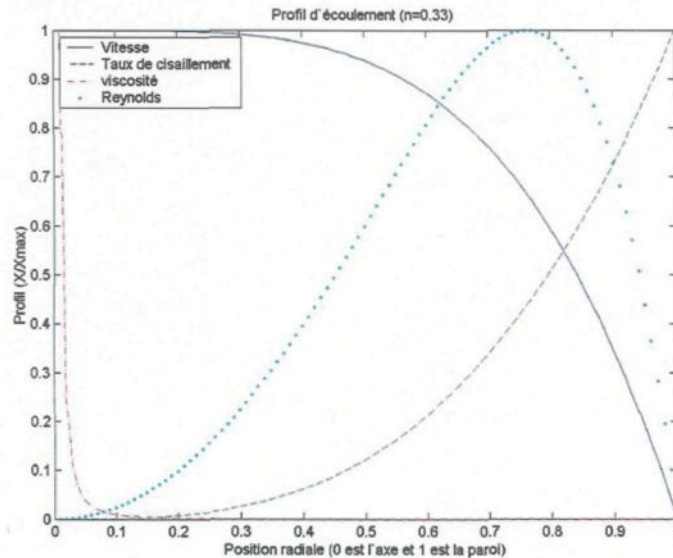


figure 27 : Profil de vitesse, du taux de cisaillement, de viscosité et du nombre de Reynolds dans un écoulement non-newtonien

Le nombre de Reynolds est nul au centre de l'écoulement (dû à la grande viscosité) et à la paroi (dû à la vitesse nulle). Entre ces deux minima, il existe un maximum dont la position se déplace vers la paroi lorsque l'exposant n s'approche de zéro. La région au centre est donc plus calme. Cela représente bien l'écoulement piston. Aussi, lors de l'augmentation de la vitesse moyenne de l'écoulement, le début de transition vers un écoulement turbulent ne s'effectuera pas au centre comme dans un écoulement newtonien. Cette transition aura lieu préalablement dans un anneau à la position radiale correspondant au maximum de Re .

Pour qualifier l'ensemble de l'écoulement, il convient cependant d'avoir une valeur moyenne du nombre de Reynolds en fonction de la vitesse. Il suffit pour cela

d'intégrer sur la section de l'écoulement et d'insérer la relation entre la vitesse moyenne et le gradient de pression.

$$\begin{aligned}\overline{\text{Re}} &= \frac{\int \text{Re} dA}{A} \\ \overline{\text{Re}} &= \frac{2}{R^2} \int_0^R r \text{Re} dr \\ \overline{\text{Re}} &= \frac{2\rho}{K^{\frac{2}{n}}} \left(\frac{n}{n+1} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{2-n}{n}} R^{\frac{n+2}{n}}\end{aligned}$$

équation 13

La vitesse moyenne en fonction du gradient de pression est :

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \frac{\int V dA}{A} \\ \bar{V} &= \left(\frac{Rn}{3n+1} \right) \left(\frac{R}{2K} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}}\end{aligned}$$

équation 14

En isolant dP/dx dans l'expression précédente et en l'insérant dans la formulation intégrée du nombre de Reynolds local on obtient la formulation en fonction de la vitesse moyenne dans l'écoulement.

$$\overline{\text{Re}} = \frac{2\rho}{K} \bar{V}^{2-n} R^n \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{2-n} \left(\frac{n}{n+1} \right)^2$$

équation 15

Cette nouvelle formulation est exacte. Elle dépend fortement de l'exposant n du matériau. Si cette formulation est utilisée avec un fluide newtonien ($n=1$), on

retrouve la formulation générale (équation 10). Cependant, avec un fluide non-newtonien, l'expression ne traduit pas la formulation non-newtonienne classique (équation 11). En fait, pour une valeur de n donnée, l'utilisation de la formulation classique entraîne une erreur valant

$$e = \frac{\text{formulation avec taux de cisaillement moyen}}{\text{formulation classique}}$$
$$e = 2^{1-n} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^{2-n} \left(\frac{n}{n+1} \right)^2$$

équation 16

L'erreur n'est fonction que de l'exposant n . Ceci représente que l'utilisation de la formulation non-newtonienne classique n'est valide que pour comparer un même fluide dans deux écoulements différents. Lorsque deux fluides ayant des réponses visqueuses différentes doivent être comparés, la formulation exacte doit être utilisée.

3.5.2. Nombre de Bingham

Le nombre de Bingham représente le rapport des contraintes élastiques par rapport aux contraintes visqueuses.

$$Bm = \frac{\tau_0 L}{\mu V}$$

équation 17

La formulation classique du nombre de Bingham moyen utilise une évaluation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse moyenne et du diamètre sans tenir compte du profil de vitesse, comme pour la formulation classique du nombre de Reynolds.

$$\overline{Bm} = \frac{\tau_0 D^n}{K \overline{V}^n}$$

équation 18

Ceci amène les mêmes erreurs d'évaluations et les mêmes difficultés lors de la comparaison de fluides ayant des réponses rhéologiques différentes.

Le profil du nombre de Bingham peut être établi de la même manière que pour le nombre de Reynolds. Cela donne la formulation de l'équation 19, mise en oeuvre dans la figure 28. Puisque le modèle utilisé n'a pas de seuil de cisaillement, la valeur de la viscosité à un taux de cisaillement de 1 s^{-1} lui a été substituée.

$$\begin{aligned} Bm &= \frac{\tau_0 D}{\mu V} \\ \mu &= K \left(\left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} r \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{n-1} \\ Bm &= \frac{\frac{2\tau_0}{K} \left(\frac{dP}{dx} \frac{r}{2K} \right)^{\frac{1-n}{n}} \left(\frac{dP}{dx} \frac{R}{2K} \right)^{\frac{-1}{n}} \frac{n+1}{n}}{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}}} \end{aligned}$$

équation 19

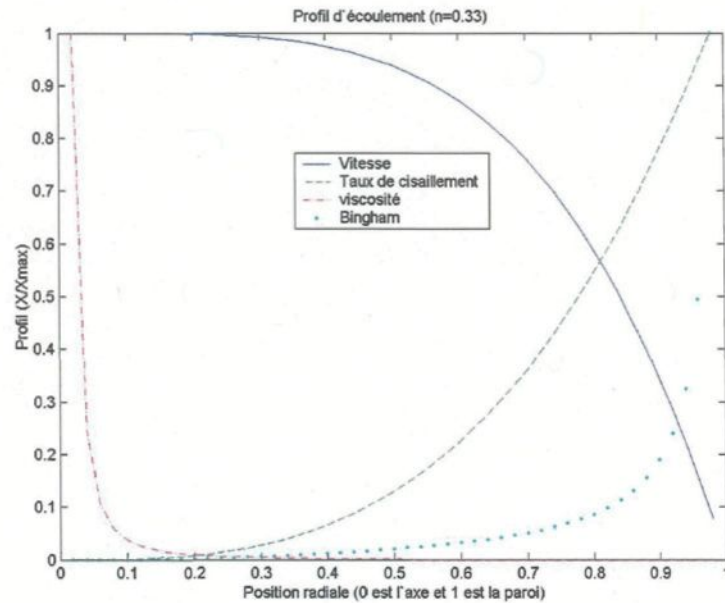


figure 28 : Profil du nombre de Bingham non-newtonien

La valeur du nombre de Bingham est nulle au centre tandis qu'elle est infinie à la paroi. Ceci cause un problème pour trouver une valeur moyenne puisqu'il est impossible d'intégrer une expression qui n'est pas définie à une des bornes.

La solution trouvée a été d'utiliser le taux de cisaillement moyen sur la section pour évaluer la viscosité.

$$\begin{aligned}\bar{\dot{\gamma}} &= \frac{\int_0^R \dot{\gamma}_{(A)} dA}{A} \\ \bar{\dot{\gamma}} &= \frac{2}{R^2} \int_0^R r \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} r \right)^{\frac{1}{n}} dr \\ \bar{\dot{\gamma}} &= 2 \left(\frac{1}{2K} \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2n+1} R^{\frac{1}{n}}\end{aligned}$$

équation 20

Cette valeur moyenne peut être exprimée en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement.

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{2\bar{V}(3n+1)}{R(2n+1)}$$

équation 21

Il suffit alors de remplacer cette expression dans la formulation du nombre de Bingham.

$$\begin{aligned}\overline{Bm} &= \frac{\tau_0 D}{\bar{\mu} \bar{V}} \\ \overline{Bm} &= \frac{\tau_0 2R}{K \left[\frac{2\bar{V}(3n+1)}{R(2n+1)} \right]^{n-1} \bar{V}} \\ \overline{Bm} &= \frac{\tau_0}{K} \left(\frac{R}{\bar{V}} \right)^n \left(\frac{3n+1}{2n+1} \right)^{1-n} 2^{2-n}\end{aligned}$$

équation 22

Comme il est impossible de déterminer un nombre de Bingham moyen exact à la paroi, on considère cette expression comme étant la meilleure approximation.

L'erreur engendrée par l'utilisation de la formulation classique est de

$$e = \left[\frac{4(3n+1)}{2n+1} \right]^{1-n}$$

équation 23

Il est aussi possible d'appliquer la même procédure pour exprimer le nombre de Reynolds moyen avec le taux de cisaillement moyen. Cela donne

$$\overline{\text{Re}} = \frac{\rho \bar{V}^{2-n} R^n}{K} \left(\frac{3n+1}{2n+1} \right)^{1-n} 2^{2-n}$$

équation 24

L'erreur relative est identique à celle du nombre de Bingham. Il est toutefois préférable d'utiliser la formulation exacte pour le nombre de Reynolds puisque celle-ci est disponible.

Les nouvelles formulations proposées permettent de comparer entre eux des fluides qui ont des comportements rhéologiques différents. Avec les outils de calcul disponibles aujourd'hui, il n'y a aucune raison de ne pas utiliser la formulation exacte du nombre de Reynolds et la formulation par taux de cisaillement moyen du nombre de Bingham pour trouver leurs valeurs moyennes. Ce sont donc ces formulations qui sont utilisées dans ce travail puisqu'elles assurent une meilleure comparaison entre les différents fluides utilisés.

3.5.3. Conditions de similarité

Lors de toute modélisation physique, il convient de faire une étude de similarité entre le modèle et le sujet original. Afin d'avoir une similarité dynamique, il faut que les nombres adimensionnels (Re et Bm) soient simultanément identiques entre le modèle et le sujet original. La procédure est de déterminer une formulation pour chacun des nombres adimensionnels assurant l'unité dans leur rapport. Par la suite, la résolution du système d'équation ou la visualisation sur un graphique des deux courbes permet de trouver les paramètres de vitesse et de dimension appropriés.

L'exemple de calcul est détaillé pour le nombre de Reynolds avec la formulation exacte.

$$\begin{aligned} \frac{\overline{Re}_{Tom}}{\overline{Re}_{Al}} &= 1 \\ \frac{\overline{Re}_{Tom}}{\overline{Re}_{Al}} &= \frac{\frac{2\rho_{Tom}}{K_{Tom}} \bar{V}_{Tom}^{2-n_{Tom}} R^{n_{Tom}} \left(\frac{3n_{Tom}+1}{n_{Tom}} \right)^{2-n_{Tom}} \left(\frac{n_{Tom}}{n_{Tom}+1} \right)^2}{\frac{2\rho_{Al}}{K_{Al}} \bar{V}_{Al}^{2-n_{Al}} R^{n_{Al}} \left(\frac{3n_{Al}+1}{n_{Al}} \right)^{2-n_{Al}} \left(\frac{n_{Al}}{n_{Al}+1} \right)^2} \\ \frac{\overline{Re}_{Tom}}{\overline{Re}_{Al}} &= \frac{\rho_{Tom}}{\rho_{Al}} \frac{K_{Al}}{K_{Tom}} \frac{\bar{V}_{Tom}^{2-n_{Tom}}}{\bar{V}_{Al}^{2-n_{Al}}} \frac{R^{n_{Tom}}}{R^{n_{Al}}} \frac{(3n_{Tom}+1)^{2-n_{Tom}}}{(3n_{Al}+1)^{2-n_{Al}}} \frac{n_{Al}^{2-n_{Al}}}{n_{Tom}^{2-n_{Tom}}} \left(\frac{n_{Tom}(n_{Al}+1)}{n_{Al}(n_{Tom}+1)} \right)^2 \end{aligned}$$

équation 25

Dans les cas où $n_{Tom}=n_{Al}$, cette formulation peut être grandement simplifiée. Vu les valeurs rapprochées de ces exposants pour les fluides en causes, la valeur de n_{Al} a été remplacée par la valeur de n_{Tom} .

$$\frac{\overline{Re}_{Tom}}{\overline{Re}_{Al}} = \frac{\rho_{Tom}}{\rho_{Al}} \frac{K_{Al}}{K_{Tom}} \left(\frac{\overline{V}_{Tom}}{\overline{V}_{Al}} \right)^{2-n} \left(\frac{R_{Tom}}{R_{Al}} \right)^n$$

équation 26

et donc puisque $\frac{\overline{Re}_{Tom}}{\overline{Re}_{Al}} = 1$,

$$\left(\frac{R_{Tom}}{R_{Al}} \right)_{\overline{Re}} = \left[\frac{\rho_{Tom}}{\rho_{Al}} \frac{K_{Al}}{K_{Tom}} \left(\frac{\overline{V}_{Tom}}{\overline{V}_{Al}} \right)^{2-n} \right]^{-1/n}$$

équation 27

La même procédure appliquée avec le nombre de Bingham donne

$$\frac{\overline{Bm}_{Tom}}{\overline{Bm}_{Al}} = \frac{\tau_{0Tom}}{\tau_{0Al}} \frac{K_{Al}}{K_{Tom}} \left(\frac{R_{Tom}}{R_{Al}} \frac{\overline{V}_{Al}}{\overline{V}_{Tom}} \right)^n$$

équation 28

et

$$\left(\frac{R_{Tom}}{R_{Al}} \right)_{\overline{Bm}} = \left(\frac{\tau_{0Tom}}{\tau_{0Al}} \frac{K_{Al}}{K_{Tom}} \right)^{-1/n} \frac{\overline{V}_{Tom}}{\overline{V}_{Al}}$$

équation 29

Les propriétés qui ont été utilisées pour déterminer ces courbes sont énumérées dans le tableau 1. Le modèle pour l'AISS est celui qui a été développé dans le

présent travail (section 3.3). Le fluide utilisé est de la pâte de tomate Heinz. Ce choix, ainsi que sa caractérisation, sont détaillés dans la section de la modélisation physique (section 4.1.7). La représentation graphique de l'équation 27 et de l'équation 29 est tracée dans la figure 29.

	Densité (kg/m ³)	Seuil de cisaillement (Pa)	K (Pa.s)	<i>n</i> (caractérisé ou modèle)	<i>n</i> (utilisé)
Aluminium semi solide (Al)	2500	182	182	0.30	0.30
Pâte de tomate (Tom)	1500	46	113	0.27	0.30

tableau 1 : Propriétés des fluides utilisés pour le dimensionnement.
L'AISS est du A356 a une fraction solide de 0.55.

La fiabilité des propriétés utilisées est toutefois à considérer, principalement pour l'aluminium semi-solide. Ces propriétés proviennent du modèle mathématique et il n'est pas certain que se sont ces valeurs qui représentent le plus fidèlement l'AISS SEED. En témoignent les différentes valeurs de viscosité obtenues par différents expérimentateurs. Particulièrement, le seuil de cisaillement de l'AISS a été estimé à la valeur de la viscosité à un taux de cisaillement égal à 1 s⁻¹. Cette estimation reste une hypothèse de modélisation.

Rapports de vitesse et de dimensions pour la pâte de tomate Heinz

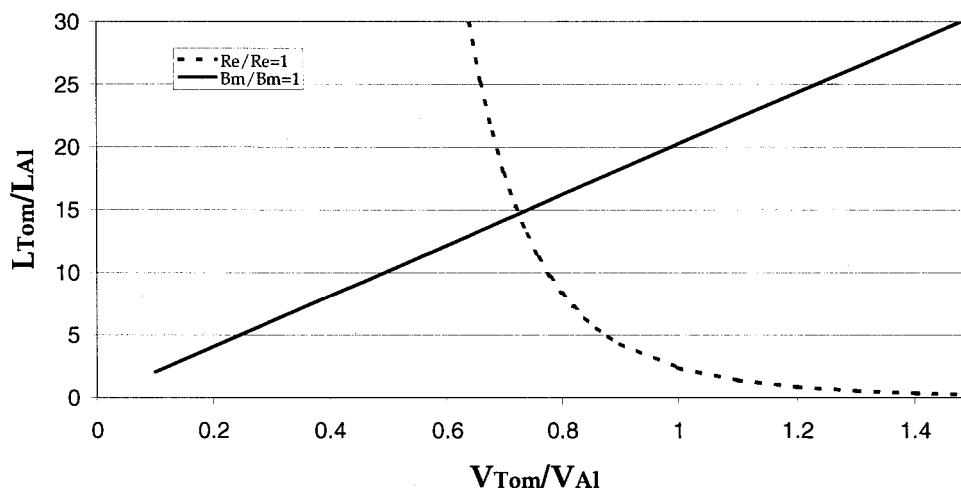


figure 29 : Dimensionnement du modèle physique avec le fluide analogue

Les résultats obtenus sont indicatifs des paramètres à utiliser dans le modèle physique. Pour avoir une condition de similarité absolue, il faut que la vitesse dans le modèle physique soit ~ 0.8 fois celle de l'opération de moulage, tandis que les dimensions du moule soient 15 fois plus grandes. Évidemment, il est impraticable de réaliser des expérimentations avec des géométries d'une telle dimension.

En considérant les résultats dictés par l'analyse de similarité et la fiabilité des données utilisées, il a été décidé de ne pas utiliser directement la pâte de tomate comme analogue à l'aluminium semi-solide. Une approche indirecte a été préférée. Il s'agit d'utiliser les résultats expérimentaux de la pâte de tomate pour valider le

comportement de la simulation, en utilisant un modèle mathématique pour représenter la viscosité de la pâte de tomate. Les conditions de simulation étant adéquates, le modèle pour l'AlSS sera mis en oeuvre par la suite. Ces résultats de simulation seront validés grâce à des expérimentations avec l'AlSS. Ainsi, les paramètres de moulage pourront être visualisés grâce à la pâte de tomate et l'efficacité de la simulation à reproduire ces comportements pourra être évaluée. Cette expertise pourra être exportée vers l'écoulement de l'AlSS avec un minimum d'expérimentation.

4. MODÉLISATION PHYSIQUE

Dans ce travail, les données concrètes ont été fournies par la modélisation physique au moyen de fluides analogues et par l'observation indirecte du remplissage des pièces en AISS. Cette modélisation physique a nécessité un montage reproduisant la géométrie du moule original et permettant la visualisation de l'écoulement durant le remplissage. Une série d'expérimentation a été réalisée au moyen de ce montage. Par la suite, le moule original a été utilisé pour couler des pièces en AISS.

4.1. Description du montage

L'ensemble du montage a été conçu pour pouvoir être installé dans la presse de moulage présentement utilisée pour former des pièces en AISS. Le montage consiste principalement en une réplique du moule original. Cette réplique comporte des inserts en acrylique qui permettent de voir l'écoulement lors du remplissage. L'utilisation d'un fluide analogue permet de faire une batterie d'essais sans avoir les contraintes reliées à l'utilisation de l'AISS. L'écoulement de ce fluide est filmé par une caméra haute vitesse.

4.1.1. Presse et environnement

La presse est un modèle industriel SC N/53 de la compagnie Bühler AG (figure 30). C'est une presse de haute technologie, destinée à former des pièces en aluminium de 4.2 à 7.9 kg avec une force de fermeture maximale de 5245 kN.

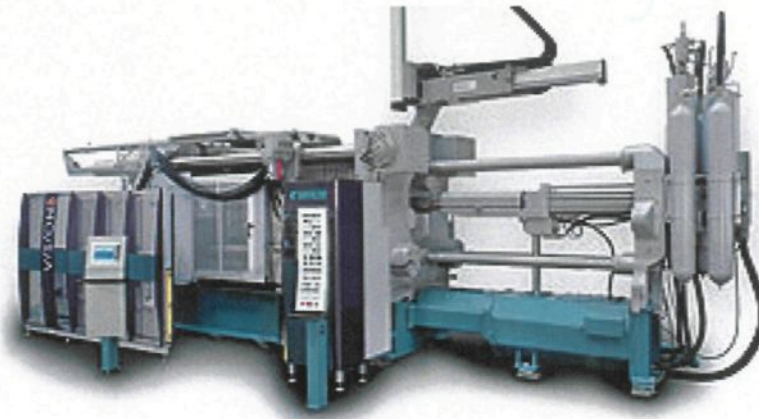


figure 30 : Presse Bühler de type Vision B; (ref : site internet de Bühler A.G.)

Elle est installée dans l'usine pilote chez STAS. Les lopins d'AlSS SEED sont fournis par l'unité de production robotisée, puis injectés.

4.1.2. Moule

Le moule utilisé dans la modélisation physique possède une empreinte qui est une réplique géométrique exacte de celle du moule en acier servant à fabriquer les éprouvettes de traction originalement. Puisque les pièces fabriquées avec le fluide analogue ne se solidifieront pas et que toutes les opérations se produisent à la température de la pièce le moule n'a pas besoin d'incorporer de système d'éjection

de la pièce ou de système de contrôle de la température. Il doit toutefois prévoir un espace de dégagement pour recevoir la caméra et le système d'éclairage. Il faut aussi que l'ensemble soit compatible avec l'installation de la presse d'injection. Les pièces ont été conçues, puis elles ont été confiées à Antoine Pelletier, chef de l'atelier d'usinage de l'IMI, pour la fabrication. M. Pelletier et les divers intervenants dans la fabrication ont aussi été consultés lors de la conception et des diverses modifications des pièces. Vu l'ampleur de l'usinage nécessaire sur les moules, la fabrication a été effectuée par un sous-traitant.

4.1.3. Pièce moulée

Le moule sert à former simultanément quatre éprouvettes de traction. Une légère coupe d'usinage en surface assure les bonnes dimensions et un bon fini pour les essais de traction. L'ensemble complet du moule comporte un anneau d'oxyde destiné à récupérer la couche extérieure du lopin, un système d'alimentation et de distribution, les quatre éprouvettes et un système de ventilation (figure 31).

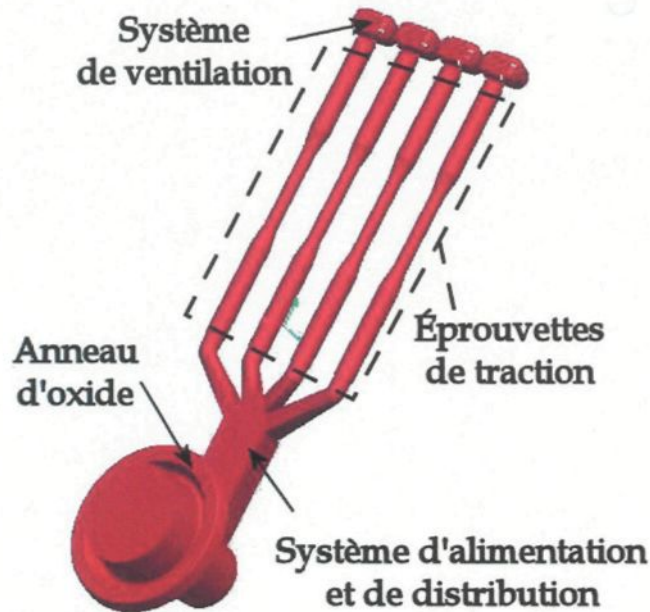


figure 31 : Schéma d'une pièce formée par le moule à éprouvettes

Le projet comporte comme contrainte de ne pas modifier la géométrie des éprouvettes pour éviter d'augmenter le temps d'usinage. Les facteurs qui peuvent être modifiés sont donc la géométrie du système d'alimentation, la géométrie du système de ventilation et les paramètres d'opération de la presse.

4.1.4. Cadre et empreinte

Le cadre et les empreintes d'un moule sont toujours composés de deux moitiés. La moitié fixe reste immobile durant toute l'opération, tandis que la moitié mobile se déplace pour permettre l'éjection de la pièce formée (figure 32).

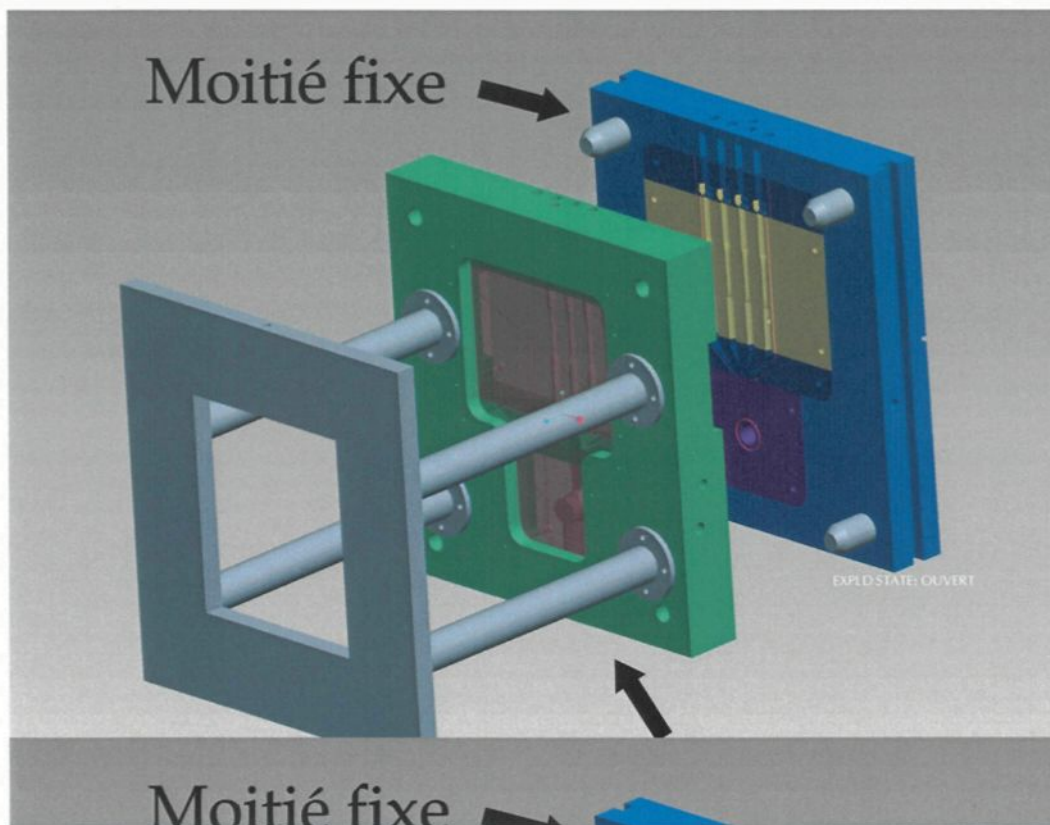


figure 32 : Schéma du moule de modélisation physique

La moitié fixe est composée d'un cadre en aluminium contenant quatre inserts aussi en aluminium. Les inserts ont été usinés pour former l'empreinte, le "négatif" en trois dimensions de la géométrie de la pièce à mouler. L'utilisation de plusieurs inserts permet de modifier une section sans avoir à faire réusinier l'ensemble de l'empreinte.

La moitié mobile est aussi composée d'un cadre et d'inserts. Ceux-ci ont toutefois été modifiés pour permettre la visualisation du remplissage. Le cadre a été évidé

dans sa moitié arrière, et les inserts ont été fabriqués en acrylique poli transparent (figure 33).

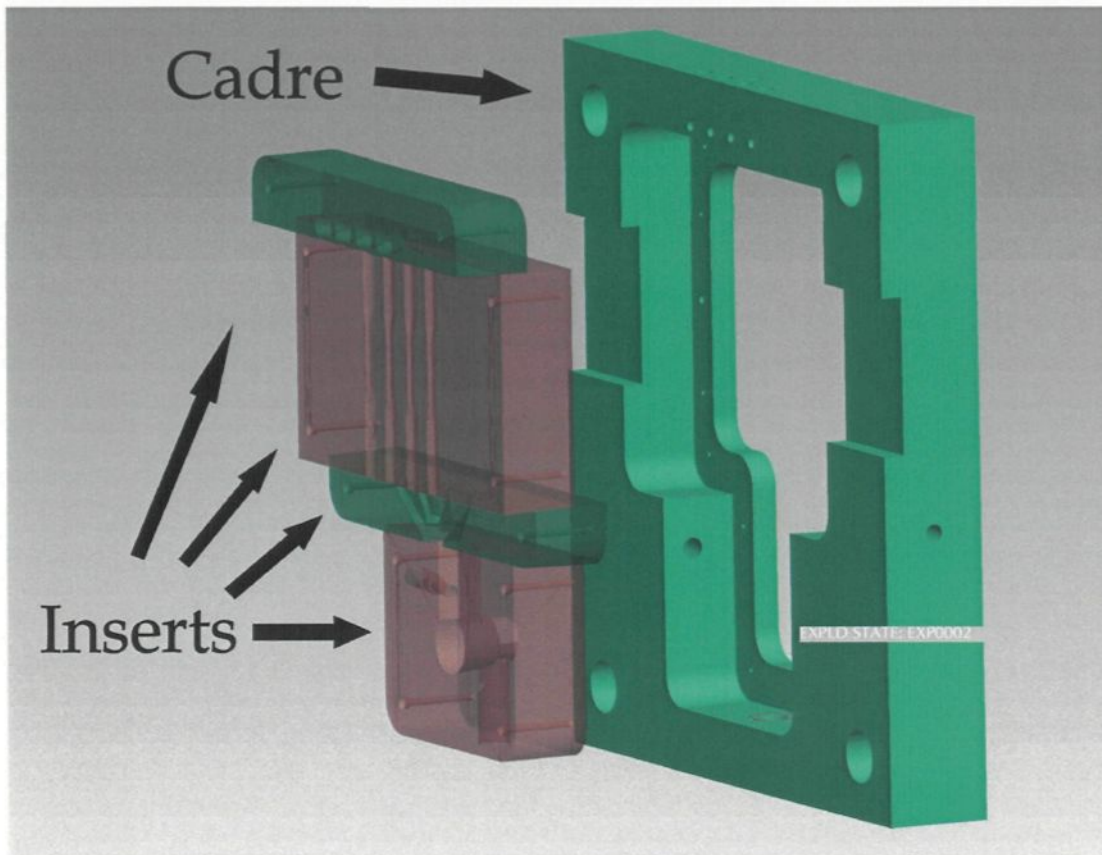


figure 33 : Détail de la moitié mobile du moule (cadre et inserts)

Afin de permettre l'installation d'une caméra vidéo et d'un ensemble d'éclairage, un dégagement a été créé au moyen de quatre tiges de support en acier. Les quatre tiges relient la moitié mobile du moule à une plaque de fixation. Cette dernière est installée sur la partie mobile de la presse. Ainsi, lorsque la presse ouvre, tout l'ensemble de la moitié mobile du moule et le système vidéo suit le mouvement. Une photo du moule complet hors de la presse est présentée à la figure 34.



figure 34 : Le moule pour modélisation physique

4.1.5. Cylindre et piston

Le cylindre original a été reproduit avec quelques modifications (figure 35). La géométrie de l'extrémité insérée dans le moule a été remplacée par un insert. Le système de préchauffage a été éliminé. Le nouveau cylindre a été fabriqué en aluminium. Le piston a été fabriqué en laiton avec un bout en plastique haute

densité. Cela a évité la friction du piston en laiton sur le cylindre. Ces modifications mineures n'ont eu aucun impact sur la séquence d'injection.

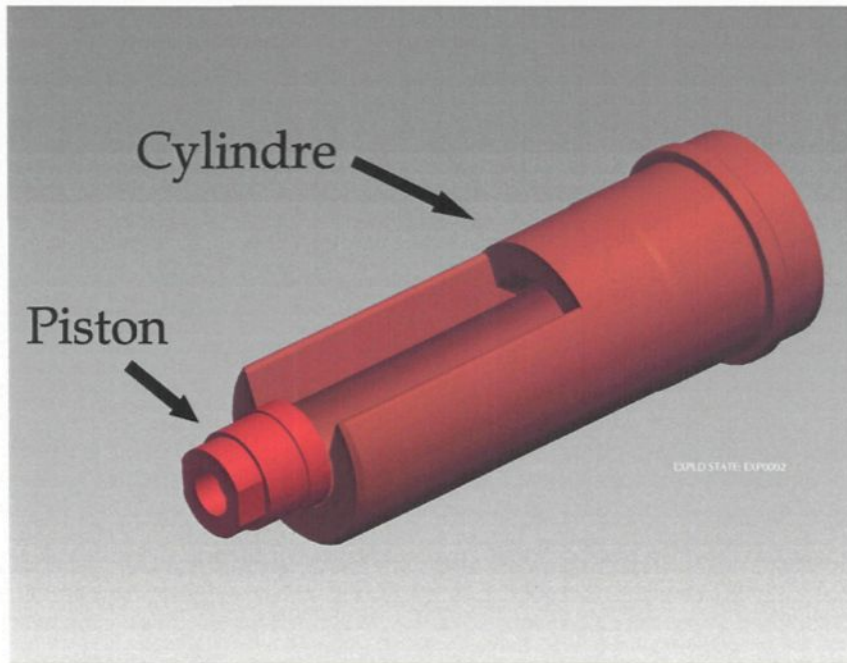


figure 35 : Schéma du cylindre et du piston utilisés pour la modélisation physique

4.1.6. Installation et opération dans la presse

Une procédure est nécessaire pour assurer un bon alignement du moule dans la presse. Il s'agit de verrouiller les deux moitiés du moule ensemble en position fermé et de positionner l'ensemble dans la presse, sur le plateau fixe. Le cylindre sert de repère d'alignement. Le plateau mobile de la presse est alors approché pour maintenir le moule en place. À ce moment, des brides sont posées pour fixer chacune des moitiés du moule sur le plateau correspondant. Le moule peut alors

être déverrouillé. Cette procédure permet d'assurer l'alignement des deux moitiés du moule. L'ensemble installé dans la presse est illustré à la figure 36.



figure 36 : Le moule installé dans la presse

En théorie, l'ensemble est capable de supporter la force de fermeture maximale de la presse et l'injection par le piston. L'application d'une pression d'intensification lors du pressage endommagera les pièces en acrylique. La partie qui est mécaniquement la plus faible est constituée des tiges de support où un facteur de sécurité de 1.86 est disponible lors de l'application de la force de fermeture maximale. La déformation exacte des inserts en acrylique est aussi inconnue. Les calculs ont été effectués analytiquement au moyen de plusieurs simplifications. Les

résultats montrent que les contraintes maximales sont de l'ordre de moins de 10% des contraintes limites de l'acrylique. Seule une étude par éléments finis permettrait de voir comment les pièces se déforment réellement.

Lors des expériences qui ont été menées avec le moule en acrylique, la fermeture s'est effectuée en contrôlant la position de la moitié mobile. Le contrôle de la force de fermeture n'a pas été utilisé. Celui-ci n'est utilisable qu'à des forces de fermeture de plus de 300 tonnes. Il a été jugé qu'il était possible d'appliquer moins de force en contrôlant le plateau mobile de la presse en position. Cette méthode a été utilisée avec succès et l'étanchéité du moule était satisfaisante. Il pourrait être possible dans des essais subséquents d'utiliser le contrôle de la force pour gérer la fermeture de la presse. Il conviendrait alors d'appliquer la force minimale disponible (300 tonnes).

4.1.7. Fluide analogue

La réalisation de nombreux essais avec l'AISS demande beaucoup de préparation et de précautions. De plus, il n'est pas possible d'injecter de l'AISS dans un moule comportant des parties en acryliques. Ces raisons ont justifié l'emploi d'un fluide analogue pour réaliser les expérimentations. Il était alors plus aisé de mettre à l'essai plusieurs paramètres sur une courte période de temps. Il faut toutefois que

le fluide choisi puisse reproduire le phénomène observé : l'écoulement de l'AlSS durant la phase de remplissage du moule.

Des recherches ont été menées pour trouver des candidats intéressants. Ces recherches ont été basées sur plusieurs critères divisés en deux catégories. Les critères pratiques font référence à l'utilisation du fluide :

- Non toxique
- Mesures de disposition nécessaires (Recyclable)
- Travaillable à température ambiante
- Soluble dans l'eau (Nettoyable)
- Disponible en quantité suffisante (quelques dizaines de litres)
- Manipulation aisée

Ils assurent qu'il sera plus aisé de réaliser des essais avec le fluide analogue qu'avec l'AlSS. La seconde catégorie est celle des critères techniques :

- Ordre de grandeur de la viscosité (similaire à AlSS)
- Rhéofluidifiant
- Seuil de cisaillement τ_0 (préférable mais non nécessaire)
- Biphase (solide/liquide)

Ces critères permettent de choisir le fluide qui se rapproche le plus des propriétés rhéologiques de l'AlSS.

Le fluide qui a été choisi est la pâte de tomate. Ses avantages pratiques sont très importants et ses propriétés rhéologiques justifient son choix technique. Deux

marques de pâte de tomate, Hunt's et Heinz, ont été caractérisées par le département de génie chimique de l'université Laval. Les propriétés rhéologiques des deux étant très similaires, la pâte de tomate Heinz (figure 37) a été choisie parce qu'il était plus facile d'en obtenir localement en quantités importantes.



figure 37 : Pâte de tomate Heinz en contenant de 100 oz.

Son comportement rhéologique se rapproche de celui de l'aluminium semi-solide (figure 38).

Comparaison de la viscosité de l'AlSS et de la pâte de tomate Heinz

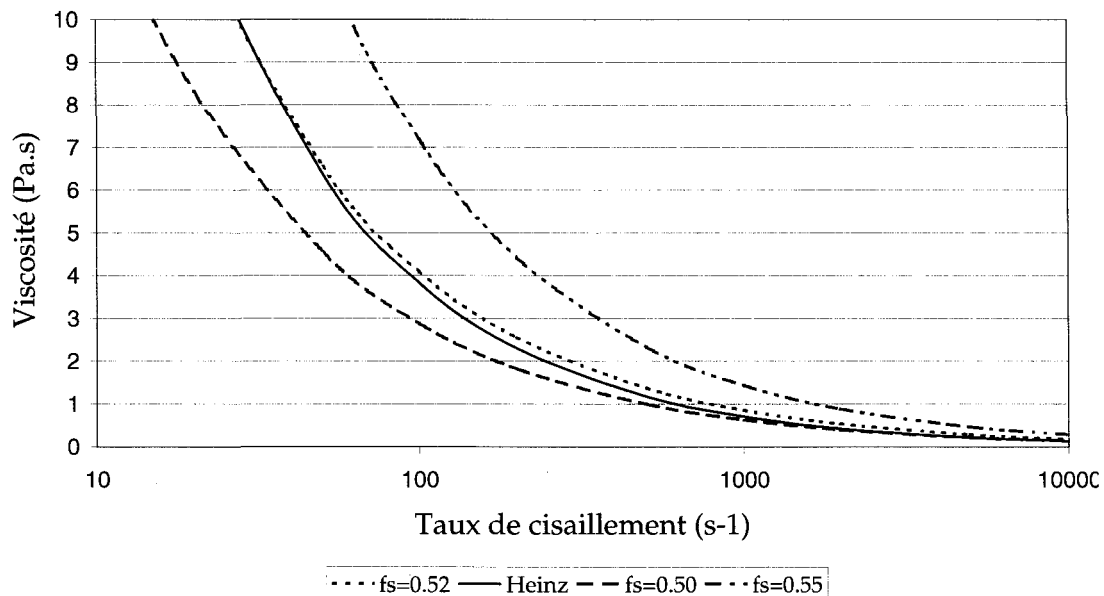


figure 38 : Modèle de viscosité de la pâte de tomate

La pâte de tomate a une viscosité qui est très similaire au modèle utilisé dans ce travail pour l'aluminium semi-solide à une fraction solide de 52%. Les valeurs de viscosité du modèle pour l'AlSS sont aussi montrées pour des fractions solides de 50% et 55% à titre indicatif. La rhéologie de la pâte de tomate se situe bien dans la plage de fraction solide utilisées dans le moulage sous pression.

Ce comportement rhéologique a été modélisé par une loi de puissance où $K=112.82$ et $n=0.2652$ selon les courbes de viscosité en fonction du taux de cisaillement déterminées expérimentalement.

4.1.8. Caméra

Les vidéos ont été filmées avec une caméra numérique haute vitesse FASTCAM-PCI 10X de Photron (figure 39). Cette caméra capte les images grâce à un capteur CCD de 1/3 pouce. Le convertisseur analogique/numérique a une résolution de 8 bits en noir et blanc. Un maximum de 512 Mb peut être enregistré dans la mémoire de la caméra pour chaque film. La durée exacte dépend de la cadence et de la taille des images filmées. La bande passante maximale est de 491.5 Mbits/s.



figure 39 : Camera haute vitesse FASTCAM-PCI 10X

Les vidéos qui ont été réalisées durant ces essais ont cadré différentes régions du moule. Des plans larges ont été tournés pour avoir des vues d'ensemble du remplissage. Ces plans larges utilisent une résolution de 512 x 480 pixels à une vitesse d'acquisition de 250 images par seconde (fps). Une lentille de 3.5 mm permettait de voir une région couvrant environ la moitié de la zone des éprouvettes du moule. Des plans larges de la moitié supérieure et de la moitié

inférieure ont été enregistrés. Des plans de vue rapprochés ont permis de cibler certaines régions critiques avec une lentille de 12.5 mm. Les plans rapprochés utilisaient une résolution de 256 x 240 pixels à une cadence de 1000 fps. Ceux-ci correspondent au divergent des éprouvettes et au coude extérieur du système d'alimentation.

4.1.9. Éclairage

Plus la cadence des images enregistrées est grande, plus le temps d'ouverture de l'obturateur de la caméra est petit, plus la quantité d'éclairage nécessaire augmente. Des mesures spéciales ont été prises sur l'environnement et sur l'équipement d'éclairage pour pousser la vitesse d'obturation jusqu'à 1/5000 s.

Une boîte a été créée avec du carton blanc. Cette boîte entoure complètement la section vidéo du moule et permet de maximiser la lumière produite à l'intérieur. Elle permet aussi d'utiliser un éclairage indirect, de manière à ne pas créer d'éblouissement (figure 40).

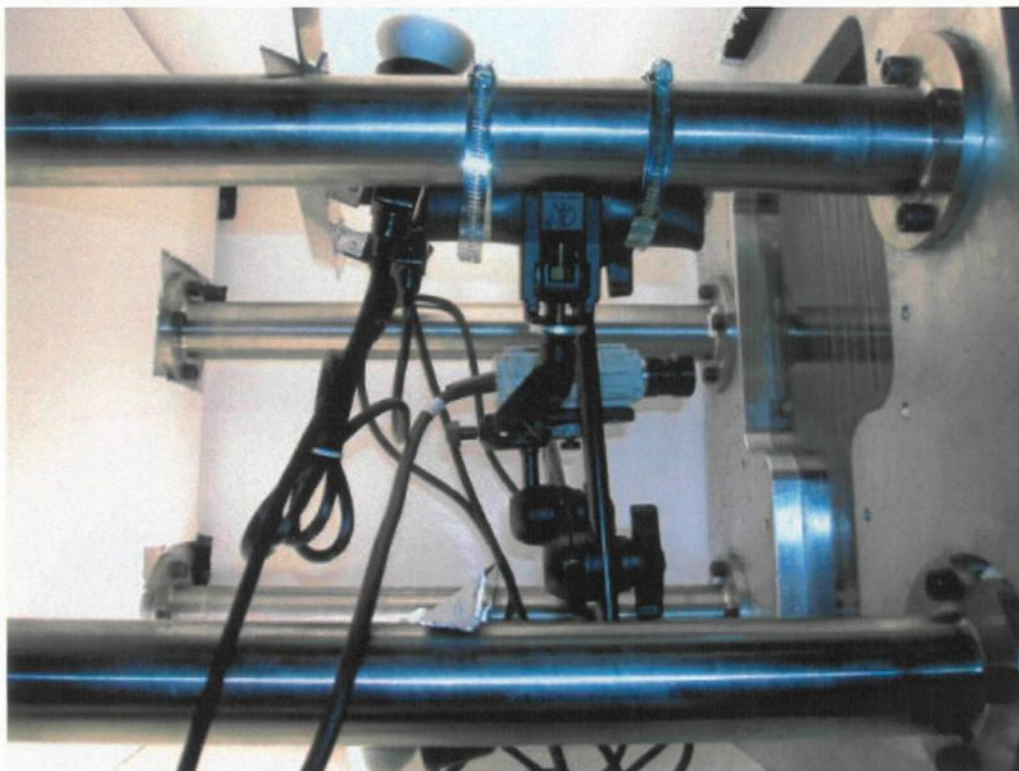


figure 40 : Système d'éclairage et caméra dans la boîte blanche

À l'intérieur de cette boîte blanche, six projecteurs incandescents de 75 W chacun ont été installés. Pour minimiser la variation d'amplitude de la lumière produite à la fréquence de 60 Hz du secteur, un redresseur/amortisseur a été conçu. Le but était d'obtenir du courant 120 V DC à partir du 120 V AC, éliminant ainsi toute variation cyclique du voltage. Un petit circuit électronique consistant en un pont de diode et un condensateur de 300 μ F branchés en parallèle a été conçu. L'appareil n'est pas parfait mais il atténue grandement les oscillations périodiques de la lumière émise.

4.2. Procédure expérimentale

Trois campagnes principales d'expérimentation ont eu lieu lors de ce travail. La première a eu lieu au début du mois de mai 2005 et une seconde a suivi un mois plus tard. Ces deux campagnes ont utilisé de l'eau et de la pâte de tomate comme fluide injecté. Le but de ces deux premières campagnes était d'obtenir des vidéos de bonne qualité montrant la séquence de remplissage du moule avec les divers fluides. Une attention particulière fut apportée à diverses zones identifiées comme étant propices à l'apparition de phénomènes caractéristiques de l'écoulement tel que de la turbulence, le mode de remplissage ou les zones de basse pression. Une troisième campagne a eu lieu au mois d'août 2005. Celle-ci a utilisé de l'aluminium semi-solide SEED à l'injection. Il s'agissait alors d'obtenir une vision du comportement de l'AlSS lors du remplissage du moule.

4.2.1. Essais avec l'eau

Il est très aisé de réaliser une multitude d'essais avec l'eau en modifiant les paramètres à chaque fois. L'eau a donc été utilisée en premier lieu pour développer des pratiques efficaces. Les équipements ont pu être testés individuellement, ainsi que leurs interactions. Les paramètres ont été mis à l'essai pour sélectionner les plus pertinents. L'eau permet de voir comment un fluide newtonien à faible viscosité (similaire à l'aluminium liquide) se comporte dans le moule. Pour

maximiser le contraste avec le fond de l'image, un colorant alimentaire bleu a été ajouté à l'eau. Au total, 69 essais filmés ont été réalisés avec l'eau. 42 de ces essais ont eu lieu au cours de la première campagne d'expérimentation et les 27 autres se sont déroulés lors de la seconde campagne.

Les deux premières campagnes se sont déroulées d'une manière similaire. Il a fallu environ une journée pour installer le moule en acrylique, puis une seconde journée pour installer et vérifier le montage vidéo incluant la caméra, l'éclairage, le PC et les accessoires. Cette phase est l'installation préliminaire. Par la suite vient l'expérimentation. Celle-ci se déroule comme suit :

- le moule est fermé (mode d'inspection)
- l'éclairage et la qualité de la prise vidéo sont vérifiés (et ajustés au besoin)
- le moule est ouvert
- le cylindre est rempli d'eau (jusqu'à ce qu'il déborde par le système d'alimentation)
- les paramètres sont fixés dans l'ordinateur de la presse
- les paramètres sont fixés dans le PC de contrôle de la caméra
- après consensus entre l'opérateur de la presse et l'opérateur de la caméra, le départ de la séquence semi-automatique est lancé
- les portes d'isolement se ferment, le moule se ferme, les accumulateurs se chargent
- la caméra est mise en mode d'enregistrement continu (trigger center, standby)

- après consensus entre l'opérateur de la presse et l'opérateur de la caméra, l'injection manuelle est lancée
- le piston se met en mouvement
- lorsque la caméra commence à voir du fluide, le déclencheur est activé
- l'injection se termine
- le piston est retiré en mode manuel
- le moule et les portes d'isolement sont ouverts en mode manuel
- la séquence filmée est enregistrée
- les surfaces du moule sont épongées pour retirer l'eau

Ces opérations sont nécessaires pour chaque injection et permettent de mettre à l'essai un ensemble de paramètres. Le tout prend environ 5-10 minutes à chaque essai. Lors du retrait du piston, l'eau redescend dans le cylindre et elle peut être réutilisée. Il suffit alors de combler le manque dans le cylindre pour atteindre le niveau maximal de remplissage à nouveau. Les pertes correspondent à ce qui reste dans le moule suite au retrait du piston. Cela représente moins de 150 mL d'eau par essai.

La première campagne a servi à vérifier la capacité du montage à réaliser de bonnes prises de vue et à observer l'importance des paramètres. Avec l'eau, l'impact de la vitesse d'injection et de l'ouverture des valves de ventilation a été observé. Six vitesses d'injection (de 0.02 à 0.4 m/s) et cinq configurations de ventilation ont été essayées. Les configurations de ventilation incluent l'ouverture (ou pas) des trous pour les fibres optiques, le degré d'ouverture des valves (x tours d'ouvert sur 13 tours possibles), ainsi que l'effet d'un débalancement de la ventilation entre les éprouvettes de gauche et les éprouvettes de droite.

La seconde campagne a permis d'obtenir de meilleures vidéos, surtout lors des prises de vue rapprochées à haute vitesse. La vitesse d'injection fut le seul paramètre à être modifié. Il avait une valeur haute (0.3 m/s) et une valeur basse (0.05 m/s). La source de lumière guidée par fibre optique a été utilisée en renfort de l'éclairage ambiant pour rehausser les contrastes à l'intérieur des éprouvettes.

Une liste des paramètres d'expérimentation et de capture vidéo pour chaque essai est disponible à l'annexe I.

4.2.2. Essais sur la pâte de tomate

Les deux premières campagnes d'expérimentation ont aussi permis de réaliser les essais avec la pâte de tomate. Le montage était le même qu'avec l'eau. Seul le fluide en cause était changé. La pâte de tomate reproduit le comportement d'un fluide visqueux non-newtonien rhéofluidifiant, avec des propriétés d'écoulement macroscopique similaires à celles de l'aluminium semi-solide. Un total de 73 essais ont été réalisés, 39 lors de la première campagne et 34 lors de la seconde.

La procédure expérimentale avec la pâte de tomate est similaire à celle de l'eau. Les étapes de chargement et de nettoyage étaient toutefois plus complexes. Un essai se déroulait comme suit :

- le moule est fermé (mode d'inspection)
- l'éclairage et la qualité de la prise vidéo sont vérifiés (et ajustés au besoin)
- le moule est ouvert

- une charge d'environ 550 g de pâte de tomate est mesurée et déposée dans le cylindre
- les paramètres sont fixés dans l'ordinateur de la presse
- les paramètres sont fixés dans l'ordinateur de contrôle de la caméra
- après consensus entre l'opérateur de la presse et l'opérateur de la caméra, le départ de la séquence semi-automatique est lancé
- les portes d'isolement se ferment, le moule se ferme, les accumulateurs se chargent
- la caméra est mise en mode d'enregistrement continu (trigger center, standby)
- après consensus entre l'opérateur de la presse et l'opérateur de la caméra, l'injection manuelle est lancée
- le piston se met en mouvement
- lorsque la caméra commence à voir du fluide, le déclencheur est activé
- l'injection se termine
- le piston est retiré en mode manuel
- le moule et les portes d'isolement sont ouverts en mode manuel
- la séquence filmée est enregistrée
- les surfaces du moule sont nettoyées avec des spatules pour retirer grossièrement la pâte de tomate
- les surfaces du moule sont nettoyées avec des linges pour retirer les restants de pâte de tomate

Le nettoyage est une opération beaucoup plus longue avec la pâte de tomate qu'avec l'eau. L'eau redescend dans le cylindre lorsque le piston se retire, alors que la pâte de tomate reste collée dans le moule. Il faut alors retirer le gros de la pâte de

tomate avec des spatules et nettoyer les surfaces du moule avec des linges (figure 41). Cette tâche prend environ 15-30 minutes à deux opérateurs.



figure 41 : Nettoyage du moule

L'utilisation de jets d'eau ou de vapeur pour accélérer le nettoyage a été considérée mais l'environnement sensible aux projections d'eau et de pâte de tomate a éliminé cette alternative. Il n'est pas réaliste de retirer manuellement toute la pâte de tomate du moule à chaque essai. Une certaine quantité de pâte de tomate reste logée dans le fond du cylindre, dans l'anneau d'oxyde et dans le système de ventilation. Cette quantité doit être considérée lors du chargement du moule. À la fin de la journée d'expérimentation avec la pâte de tomate, un nettoyage plus complet, incluant quelques séquences d'injections d'eau, permet de remettre l'équipement.

L'insertion de la charge de fluide dans le cylindre est une opération plus sensible avec la pâte de tomate. La charge insérée a été pesée à chaque essai. Il s'est avéré qu'une charge variant entre 500 et 580 grammes permettait un bon remplissage du moule. Cette variation est due à la quantité indéterminée de pâte de tomate présente dans le moule une fois le nettoyage terminé. Le premier essai de la journée nécessite une charge plus importante (750 g) pour remplir le moule au complet. Par la suite, les charges plus légères peuvent être utilisées sans compromettre le bon remplissage du moule.

De la même manière qu'avec l'eau, la première campagne d'expérimentation a servi à définir l'importance des paramètres et à valider la procédure expérimentale. Des vitesses d'injection allant de 0.02 à 0.3 m/s et cinq configurations de ventilation ont été essayés.

La seconde campagne a permis de rehausser la qualité des vidéos et de faire des observations plus précises. Les plans rapprochés ont été filmés avec des vitesses d'injection hautes (0.3 m/s) et basses (0.05 m/s). Les fibres optiques n'ont pas été utilisées parce que la pâte de tomate n'est pas transparente. Elles ne procuraient donc qu'un avantage limité à une meilleure définition du front de remplissage. Il a

été décidé qu'il était préférable de boucher les trous pour mieux reproduire les conditions de ventilation dans le moulage des pièces en AISS.

L'ensemble des conditions expérimentales utilisées dans chaque essai est détaillé dans l'annexe I.

4.2.3. Essais sur l'aluminium semi-solide

Il est très complexe de filmer le remplissage du moule lorsque le fluide est de l'aluminium semi-solide. La visualisation de l'écoulement durant le remplissage s'est alors effectuée indirectement à l'aide de remplissages partiels. Des pièces complètes ont aussi été coulées pour comparer les défauts présents dans le métal solidifié avec les patrons d'écoulement.

Il est à noter que le moule utilisé pour former des pièces en AISS a été modifié légèrement au niveau du système de distribution. Cette modification a eu un impact sur les pièces formées et elle a été rapportée dans les simulations.

Une opération de remplissage partiel consiste à arrêter la presse alors qu'elle n'est pas encore rendue à la fin de sa course. Une pièce incomplète est ainsi obtenue. Cela correspond à une image dans la séquence de remplissage. La production de

plusieurs pièces, avec des positions d'arrêts réparties régulièrement sur tout la course du piston, permet d'avoir une animation de la séquence de remplissage. Cette méthode n'est toutefois pas parfaite. La répétabilité d'un essai n'est pas garantie. Il se peut que pour une position d'arrêt du piston, les quatre branches se remplissent toutes également, mais qu'à l'essai subséquent il y ait deux branches qui se remplissent démesurément par rapport aux deux autres. Il faut alors beaucoup de chance pour réaliser une animation qui soit très fluide. De plus, le mouvement du fluide peut continuer une fois que le piston s'est arrêté. Cela est dû à son inertie et à la gravité. Il est alors possible que la configuration de la pièce solidifiée ne corresponde pas exactement à l'écoulement à cette position lors du remplissage. Les essais de remplissage partiel ont été réalisés avec une vitesse d'injection nominale de 0.1 m/s. Un exemple de courbe de remplissage est présenté à la figure 42.

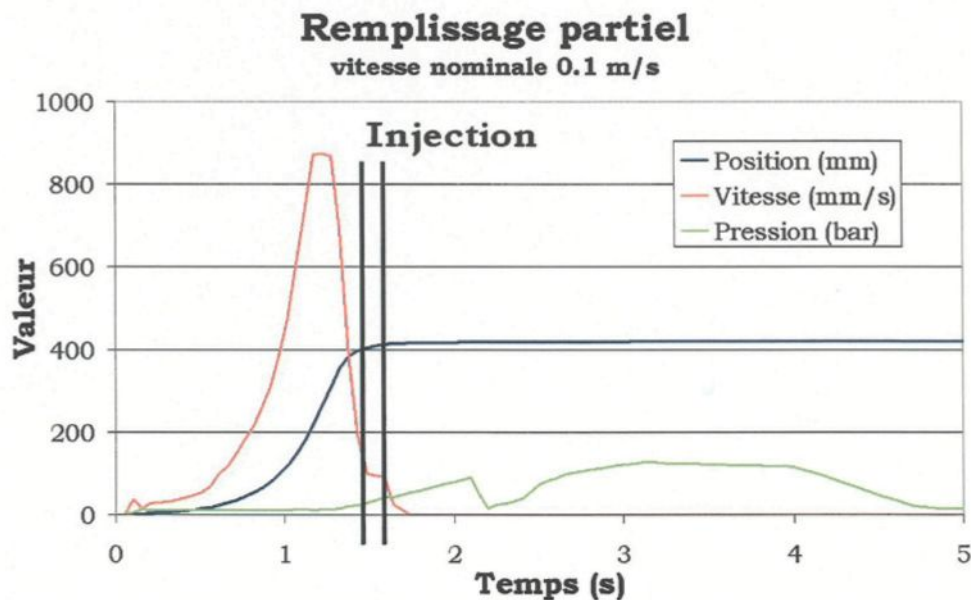


figure 42 : Exemple de courbe de remplissage

La portion de la courbe dénommée "injection" correspond approximativement au temps où le métal entre dans le système de distribution. Le déplacement avant cette portion sert à amener le piston jusqu'au métal, et le métal jusqu'au moule. Dans cet exemple, le point d'arrêt de l'injection est à 420 mm.

La composition chimique de l'alliage d'aluminium A356 utilisée dans les expérimentations est la suivante. Elle a été déterminée à partir d'un échantillon analysé par spectroscopie optique.

Élément	Si	Mg	Ti	Fe	Al	Reste
% (m/m)	7.05	0.37	0.12	0.10	92.263	0.10

tableau 2 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium A356

Pour observer les défauts dans les pièces en AlSS, des photos au microscope ont été prises sur des échantillons polis. Plusieurs pièces complètes ont été moulées selon les paramètres fournissant la meilleure intégrité de la structure. Des sections de ces pièces ont été coupées et polies, puis elles ont été observées au microscope optique et photographiées. Les régions concernées du moule sont le divergent de l'éprouvette et le coude extérieur du système d'alimentation. Des sections longitudinales et transversales ont été faites pour observer la distribution des défauts.

5. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation numérique s'est effectuée avec le logiciel commercial ProCAST. La géométrie du moule a été discrétisée en utilisant un maillage fin. Les propriétés rhéologiques du fluide ont été reproduites grâce à un modèle non-newtonien à une phase. Une approximation par éléments finis a ensuite été utilisée pour calculer l'écoulement du fluide. Un exemple de cas est présenté en annexe II. Il y est énuméré tous les paramètres utilisés dans le calcul par ProCAST.

5.1. Présentation du maillage

Le maillage est constitué d'éléments tétraédriques non-structurés. Un raffinement a été réalisé près des parois et dans les régions plus petites. Il y a 146 629 noeuds qui déterminent 704 228 éléments (figure 43). Le nombre d'éléments a été déterminé de façon à ce qu'il soit suffisamment grand pour éviter que les résultats ne soient affectés par le maillage. Toutefois, le temps de calcul n'a pas été optimisé avec rigueur vu que les ressources informatiques étaient adéquates.

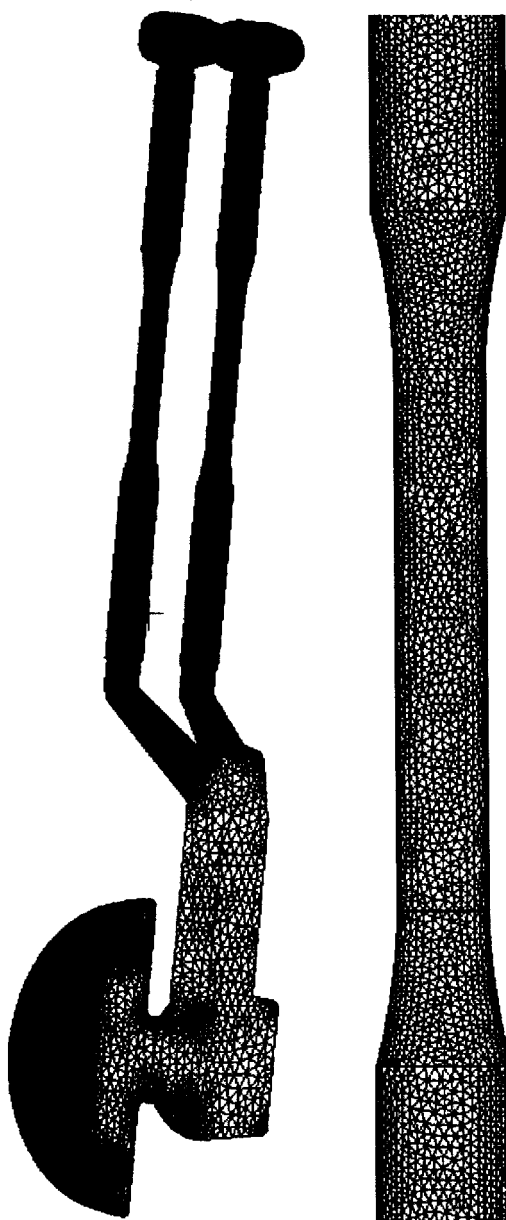


figure 43 : Maillage de la pièce moulée, vue d'ensemble et détail d'une éprouvette

Les sections importantes sont les éprouvettes de traction. Ce sont des régions cylindriques où environ quinze éléments ont été placés le long du diamètre. Un maillage similaire a été réalisé pour reproduire le moule pour les pièces en AlSS.

5.2. Mise en oeuvre du modèle non-newtonien

ProCAST propose un modèle de loi de puissance pour reproduire la viscosité de fluides non-newtoniens.

$$\mu = K(a\dot{\gamma})^b$$

équation 30

Il suffit de poser $a=1$ et $b=n-1$ pour retrouver le modèle de loi de puissance discuté antérieurement. Il est possible de définir des valeurs de K et b sur une plage de température. Il est alors aisé de définir la viscosité sur toute la plage de solidification de l'AlSS, tel que défini dans la section 3.3. Le modèle pour la pâte de tomate utilise les valeurs fixes de K et b établies à la section 4.1.7.

5.3. Description des conditions limites

La condition de non-glissement à la paroi a été imposée sur toutes les surfaces extérieures. Le plan de symétrie du modèle a été défini pour empêcher tout transfert de masse ou d'énergie dans la direction normale. Pour reproduire l'injection, une condition de vitesse uniforme sur la section a été imposée sur la section d'entrée (figure 44).

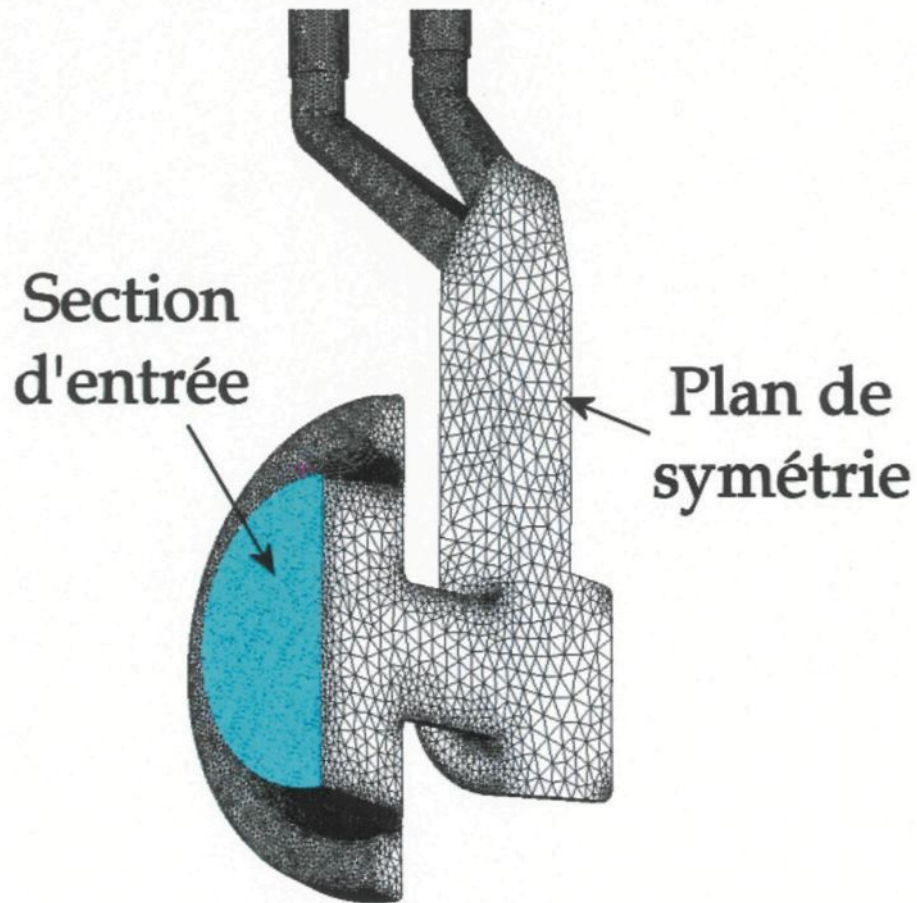


figure 44 : Régions d'application des conditions limites

Le bout des éprouvettes a été déterminé comme étant le fond du moule avec une condition de pression nulle représentant les événements. La gravité a été définie longitudinalement par rapport aux éprouvettes en direction inverse à l'écoulement du fluide. Le moule se remplit donc de bas en haut.

5.4. Système d'équations résolu

Le calcul qui est demandé à ProCAST est la résolution des équations de Navier-Stokes. Il résout donc les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0$$

équation 31

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho V \cdot \nabla V = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F$$

équation 32

Pour le calcul de la viscosité, le taux de cisaillement moyen utilisé est la norme du tenseur de taux de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ji}}$$

équation 33

$$\dot{\gamma} = \left\{ \begin{array}{ccc} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{array} \right\}$$

équation 34

La discrétisation des équations s'effectue au moyen de la méthode de Galerkin avec un schéma temporel de Crank-Nicolson. Le système d'équations ainsi obtenu est résolu par la méthode du gradient conjugué.

Il est à noter que les simulations à basse vitesse et grande viscosité (pâte de tomate et aluminium semi-solide) sont extrêmement longues à calculer. Avec un maillage rempli aux trois quarts après trois semaines de calcul, la simulation a été arrêtée. Comme le temps de calcul de chaque pas de temps augmente lorsque le moule se remplit, l'estimé de temps total de calcul dépassait alors les six semaines. La simulation a été reprise en appliquant la simplification HIVISC de ProCAST. Cette simplification résout un écoulement de Stokes, où les termes de transport sont retirés du calcul et compensés dans l'ajustement de la pression. Cette solution n'est pas exacte, mais elle permet de réduire le temps de calcul de ces simulations problématiques à environ trois jours. Il a été nécessaire d'appliquer cette simplification aux simulations d'écoulement de pâte de tomate et d'aluminium semi-solide à des vitesses d'injection de 0.05 et 0.1 m/s.

Les simulations utilisant l'eau comme fluide sont dans le domaine d'écoulement turbulent. Cependant, les modèles de turbulence n'ont pas été appliqués sur les calculs. Cette décision a été prise pour concentrer les efforts sur les écoulements

non-newtoniens de pâte de tomate et d'AlSS. Ce travail étant initiateur dans la comparaison entre un moule industriel et les résultats expérimentaux il a aussi été décidé d'utiliser un modèle sans transfert de chaleur. Ceci constitue donc la première étape dans une démarche de modélisation complète.

5.5. Simulations réalisées

Une simulation a été réalisée avec chacun des fluides (eau, pâte de tomate et AlSS) à haute et à basse vitesse. De plus, une simulation additionnelle a été réalisée avec l'AlSS à la vitesse d'injection utilisée dans les remplissages partiels et avec le maillage du moule modifié.

6. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION PHYSIQUE

Au total, 151 vidéos ont été réalisées durant les deux premières campagnes d'expérimentation. Ces vidéos fournissent une foule d'informations quant au comportement des fluides lors de l'injection dans le moule. Les séquences de remplissage général permettent de se familiariser avec le type d'écoulement en cours, tandis que les plans rapprochés servent à expliquer quelques phénomènes caractéristiques d'une configuration donnée. Les résultats vidéos sont présentés d'abord avec l'eau, puis pour la pâte de tomate. Par la suite, les résultats de remplissage partiels sont illustrés. Il est à noter que les images portent une étiquette de temps relatif. Puisqu'une origine temporelle commune n'est pas disponible, la première image de chaque séquence a été étiquetée du temps zéro. Il est ainsi possible de percevoir la vitesse du fluide et la progression temporelle de la séquence montrée.

6.1. Résultats obtenus avec l'eau

L'écoulement de l'eau présente plusieurs différences entre l'injection à basse vitesse et l'injection à haute vitesse. À basse vitesse, le facteur dominant dans l'écoulement sont les bulles d'air, tandis qu'à haute vitesse elles sont supplantées par la turbulence de l'écoulement.

6.1.1. Eau à basse vitesse ($Re=8800$)

Les plans généraux permettent d'avoir une vue d'ensemble de l'écoulement. La figure 45 présente le passage du front de remplissage lors de l'injection à basse vitesse (0.05 m/s).

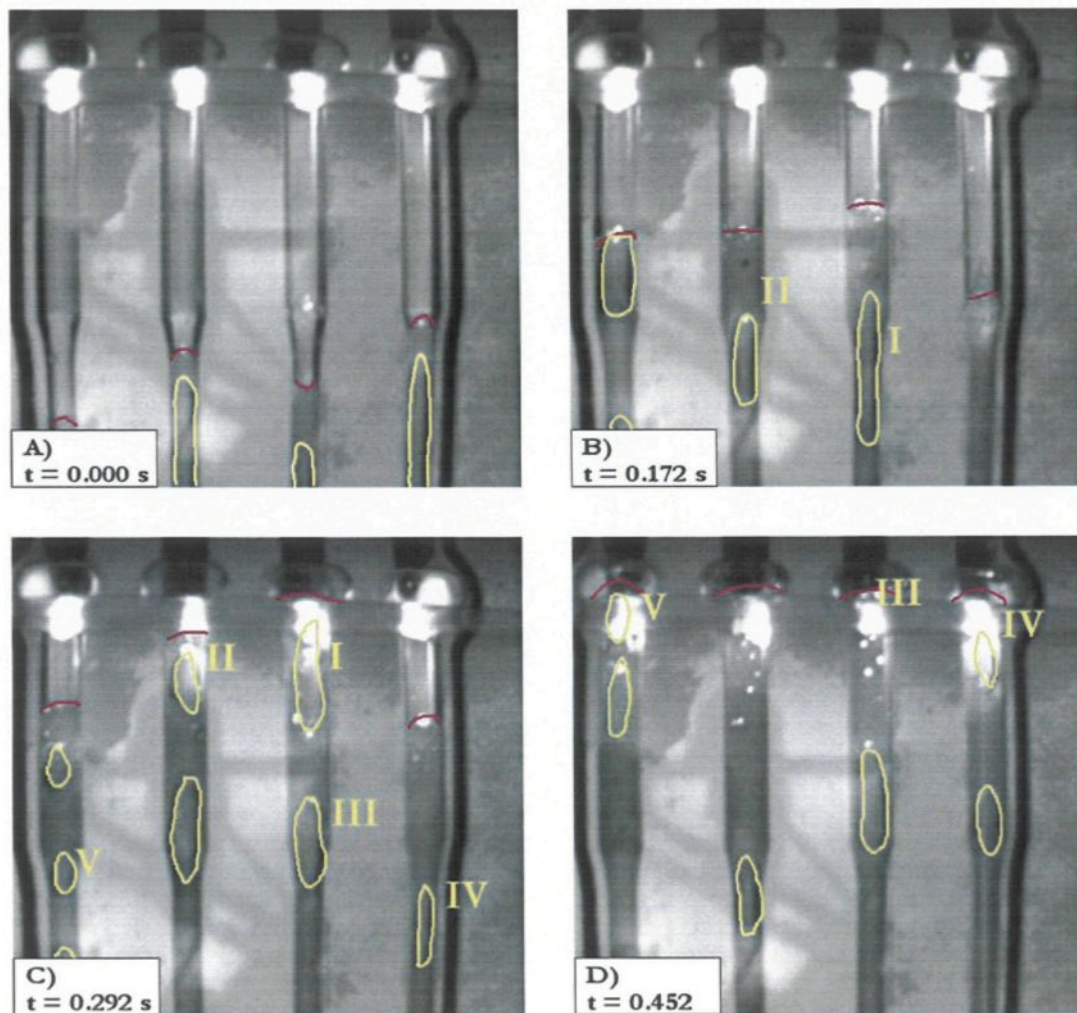


figure 45 : Injection d'eau à 0.05 m/s ($Re=8800$)

Les lignes rouges délimitent le front d'écoulement tandis que les lignes jaunes sont les contours des bulles. Les bulles qui reviennent dans plus d'une image ont été identifiées (I-V). La surface brisée ou concave du front d'écoulement est due aux bulles qui éclatent. Celles-ci montent plus vite dans les éprouvettes que le fluide. En plus d'être transportées par l'eau, elles subissent la poussée d'Archimède. Elles rattrapent donc le front d'écoulement et elles percent la surface. Visuellement, cela « déplace » le front d'écoulement vers le bas. La génération de bulles se fait de façon régulière dans le système d'alimentation. Une grosse bulle est créée et elle se divise dans les quatre branches. Les bulles sont habituellement plus grosses dans les branches intérieures.

Les fronts d'écoulement dans les quatre branches sont régulièrement brisés par les bulles qui montent. L'eau remplit toute la largeur des éprouvettes dans la section divergente. Elle est aidée dans ce mouvement par les bulles qui élargissent le front d'écoulement lorsqu'elles éclatent à cet endroit.

6.1.2. Eau à haute vitesse ($Re=52800$)

Le remplissage du moule à haute vitesse se fait de manière très turbulente. L'inertie du fluide est beaucoup plus importante et la viscosité ne permet plus de conserver un ensemble consistant. Le front d'écoulement est brisé et incohérent.

Les bulles sont encore présentes mais elles sont cisailées et divisées en très petites entités. Une vue rapprochée du divergent illustre bien le comportement de l'eau dans ces conditions (figure 46).

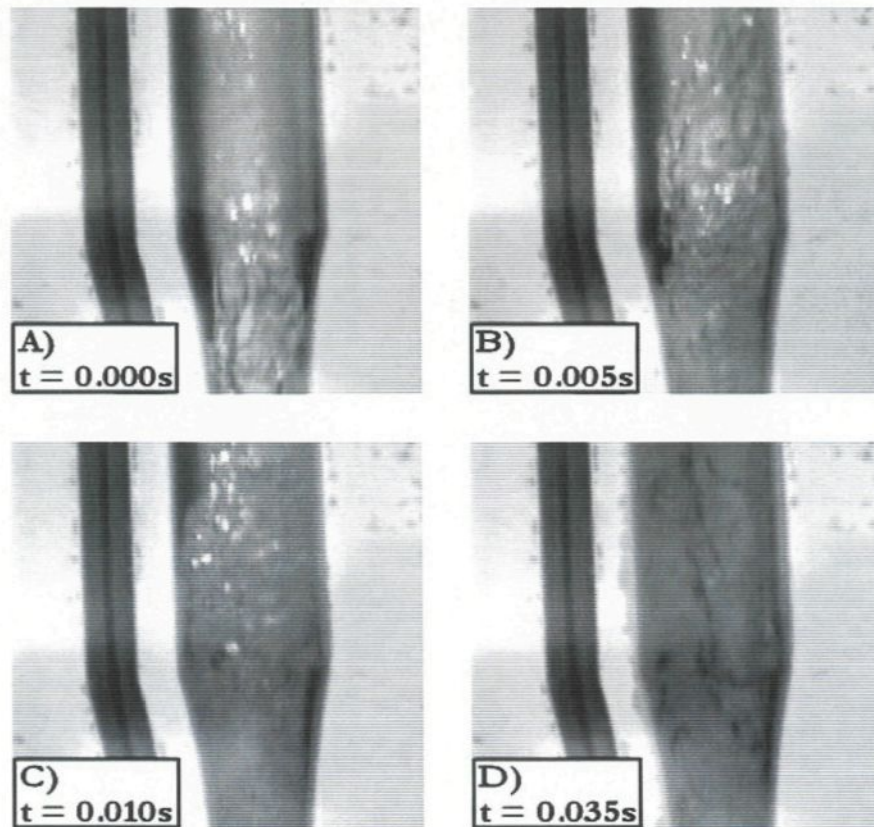


figure 46 : Injection d'eau à 0.3 m/s ($Re=52800$, détail du divergent d'une éprouvette)

On peut y voir le front d'écoulement qui est complètement incohérent. Un mouvement de vrille est présent. Même une fois que le front est passé, la turbulence est encore visible dans l'écoulement. La ligne noire à gauche de l'éprouvette est un joint d'étanchéité. Une autre évidence de la turbulence élevée est présente dans les coudes extérieurs du système de distribution (figure 47).

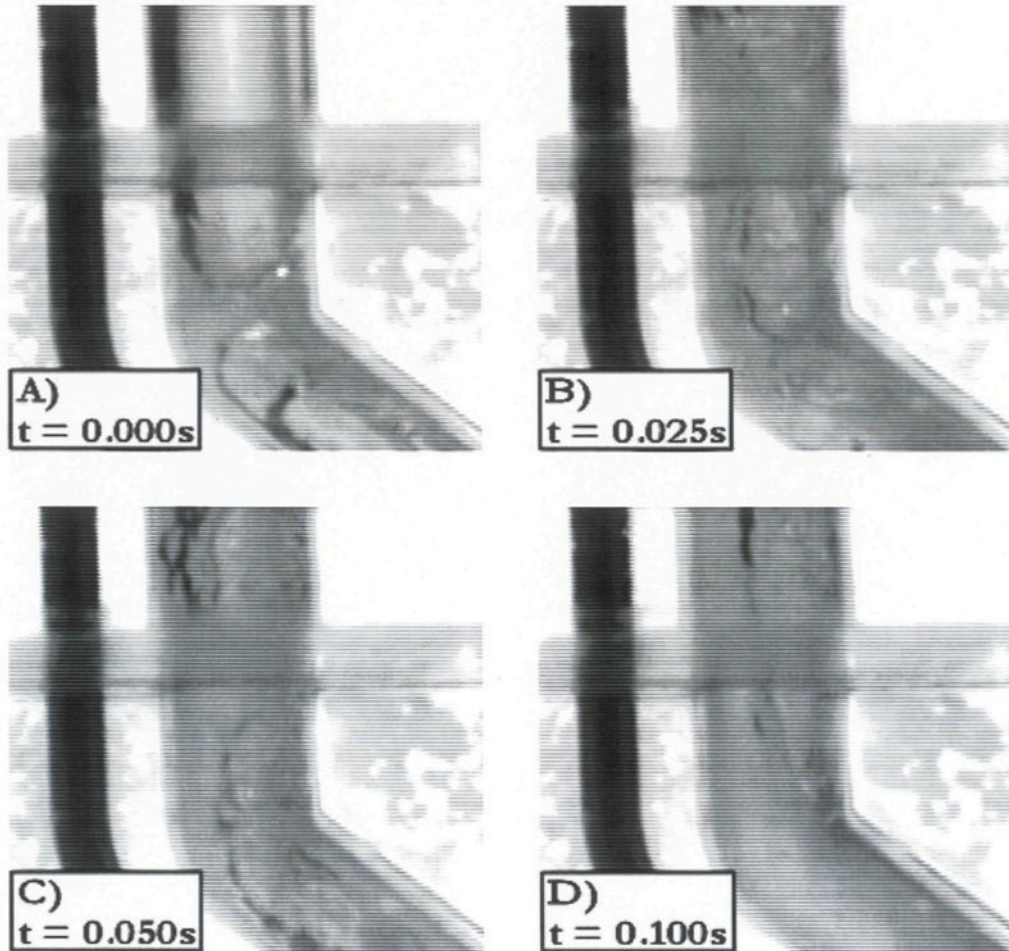


figure 47 : Injection d'eau à 0.3 m/s ($Re=52800$, détail du coude)

Le front passe en (A), accompagné de grosses bulles. Une fois qu'il est passé, les bulles et l'écoulement turbulent sont encore perceptibles (B et C). Une fois que l'écoulement se stabilise (D), il se crée une zone de basse pression à l'intérieur du coude qui produit un panache de turbulence. Ceci est dû à l'inertie du fluide qui colle la paroi extérieure, causant un différentiel de pression entre les parois intérieure et extérieure du coude.

6.2. Résultats obtenus avec la pâte de tomate

La grande viscosité de la pâte de tomate est évidente lors de l'observation du remplissage. À basse vitesse, les effets de la viscosité et de la gravité se font sentir, tandis qu'à haute vitesse, l'inertie domine le comportement.

6.2.1. Pâte de tomate à basse vitesse ($Re=5.15$)

L'injection de pâte de tomate à 0.05 m/s est illustrée à la figure 48. Les fronts d'écoulements ont été mis en évidence. Ils sont cohérents et ils conservent leur intégrité tout le long du remplissage. Les fronts des éprouvettes intérieures sont légèrement en avance sur ceux des éprouvettes extérieures.

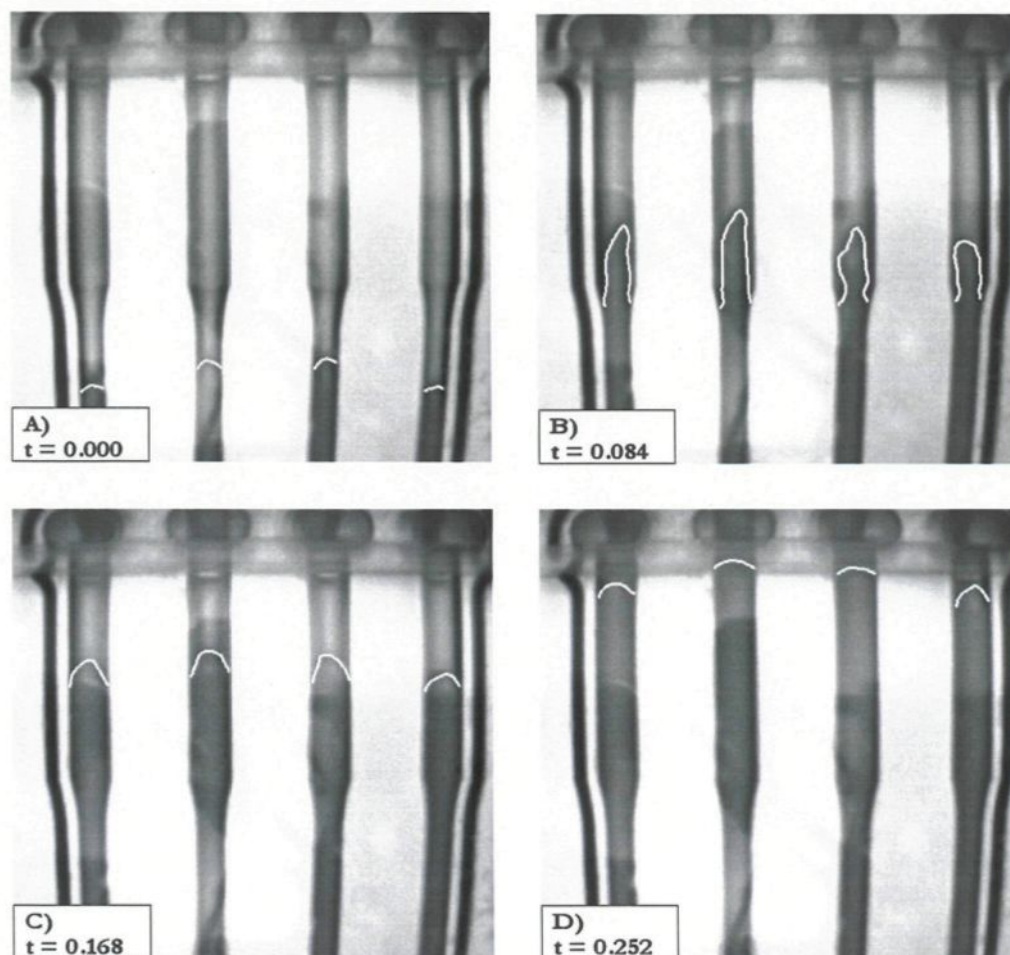


figure 48 : Injection de pâte de tomate à 0.05 m/s ($Re=5.15$)

Lorsque la pâte de tomate sort de la section mince de l'éprouvette, il se forme un jet vertical (B). Ce jet forme une colonne ascendante de pâte de tomate dont la hauteur maximale est dictée par le poids du fluide, sa viscosité et son inertie. Lorsque le poids de la colonne devient trop grand pour s'auto-soutenir, celle-ci s'effondre. La pâte de tomate coule alors vers le bas et vers les côtés jusqu'à ce qu'elle soit supportée par les parois latérales de l'éprouvette. L'écoulement reprend alors une progression vers le haut, occupant toute la largeur de l'éprouvette (C). Plus la

viscosité et l'inertie du fluide sont grandes, plus la colonne peut monter haut avant de s'affaisser.

6.2.2. Pâte de tomate à haute vitesse ($Re=114$)

Lorsque la vitesse augmente, la hauteur maximale de la colonne augmente. À une vitesse d'injection de 0.3 m/s, la colonne ascendante de pâte de tomate frappe le fond de l'éprouvette avant qu'elle ne s'effondre sur elle-même (figure 49). L'écoulement remplit alors la largeur de l'éprouvette et le remplissage s'effectue du haut vers le bas, à rebours de l'écoulement. C'est un remplissage de type disque tel qu'observé et simulé par Paradies.

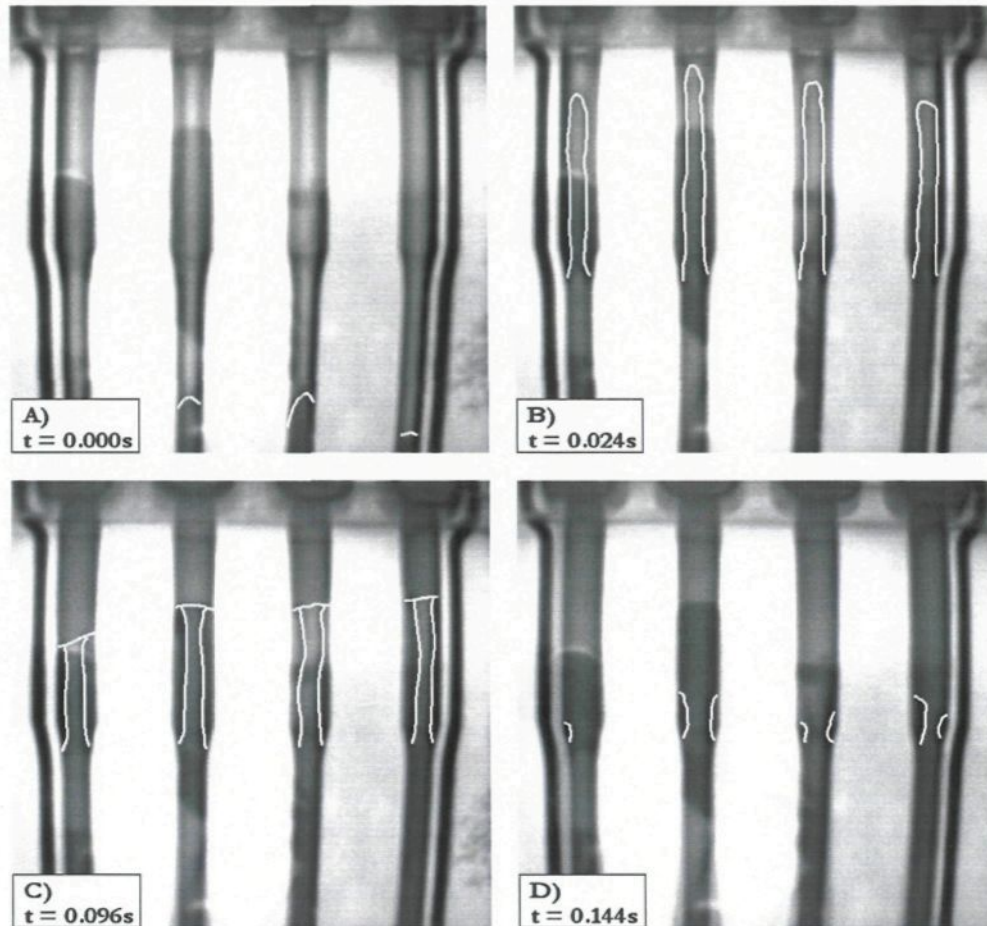


figure 49 : Injection de pâte de tomate à 0.3 m/s ($Re=114$)

En B), le jet monte encore sous l'effet de son inertie et de la poussée du fluide qui le suit. Le remplissage à rebours est montré en C). Ce comportement mène à l'emprisonnement de poches d'air dans la dernière partie remplie de l'éprouvette (D).

Un autre témoin de l'inertie du fluide est son comportement dans le coude extérieur du système de distribution (figure 50). À cet endroit, le changement de direction important pousse la pâte de tomate vers l'extérieur du coude.

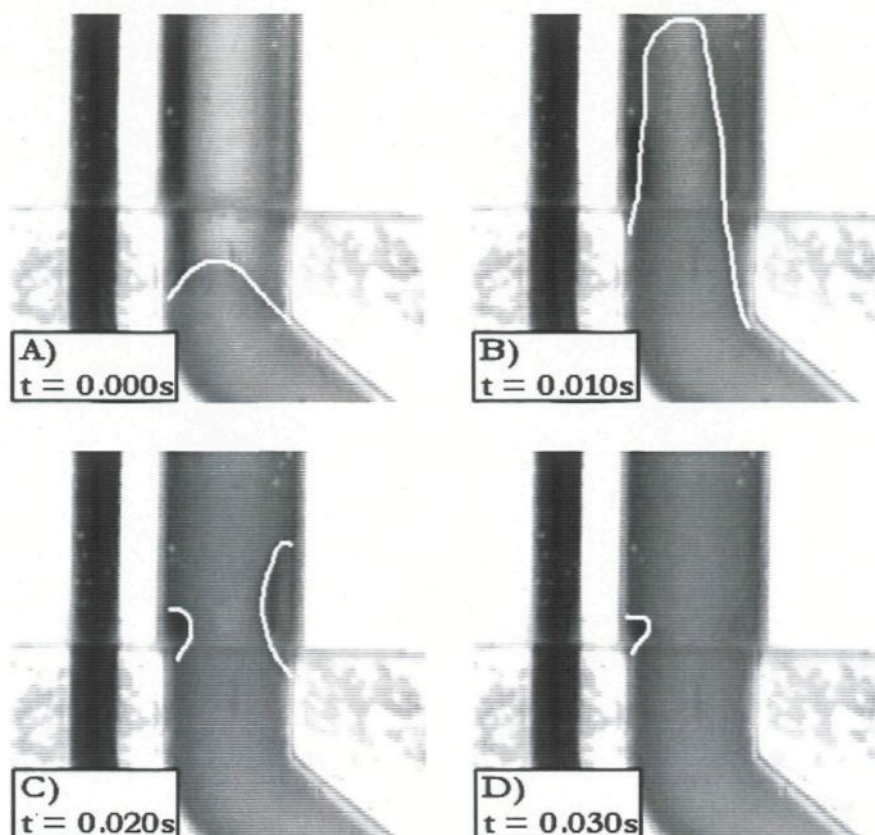


figure 50 : Injection de pâte de tomate à 0.3 m/s ($Re=114$, détail du coude)

L'intérieur du coude reste vide pendant un certain temps. La pâte de tomate monte et entre en contact avec les parois de l'éprouvette au-dessus du coude, formant une poche d'air (C). Cet effet est amplifié par la transition subite à un diamètre plus grand lors du passage de l'insert de distribution à l'insert de l'éprouvette (visible dans l'image par la présence d'un trait horizontal).

6.2.3. Pâte de tomate à 0.1 m/s ($Re=17.1$)

L'injection de pâte de tomate à 0.1 m/s présente un comportement hybride de ceux observés à 0.05 et 0.3 m/s (figure 51). La pâte de tomate monte dans les quatre éprouvettes et des jets sont formés dans les sections des mors. La hauteur de ce jet est plus grande qu'à 0.05 m/s, sans toutefois qu'elle ne vienne frapper le fond de l'éprouvette. Il se produit alors un phénomène qui est proche de l'affaissement décrit dans le cas à 0.05 m/s. Ici cependant, il présente un peu plus de rigidité dans la colonne de pâte de tomate. En effet le bout du jet reste immobile et ne descend pas durant son élargissement. Il est supporté par l'apport de fluide provenant du bas, qui déforme aussi la colonne D). Celle-ci se tord et s'élargit jusqu'à remplir toute l'éprouvette. La progression du front reprend alors vers le haut.

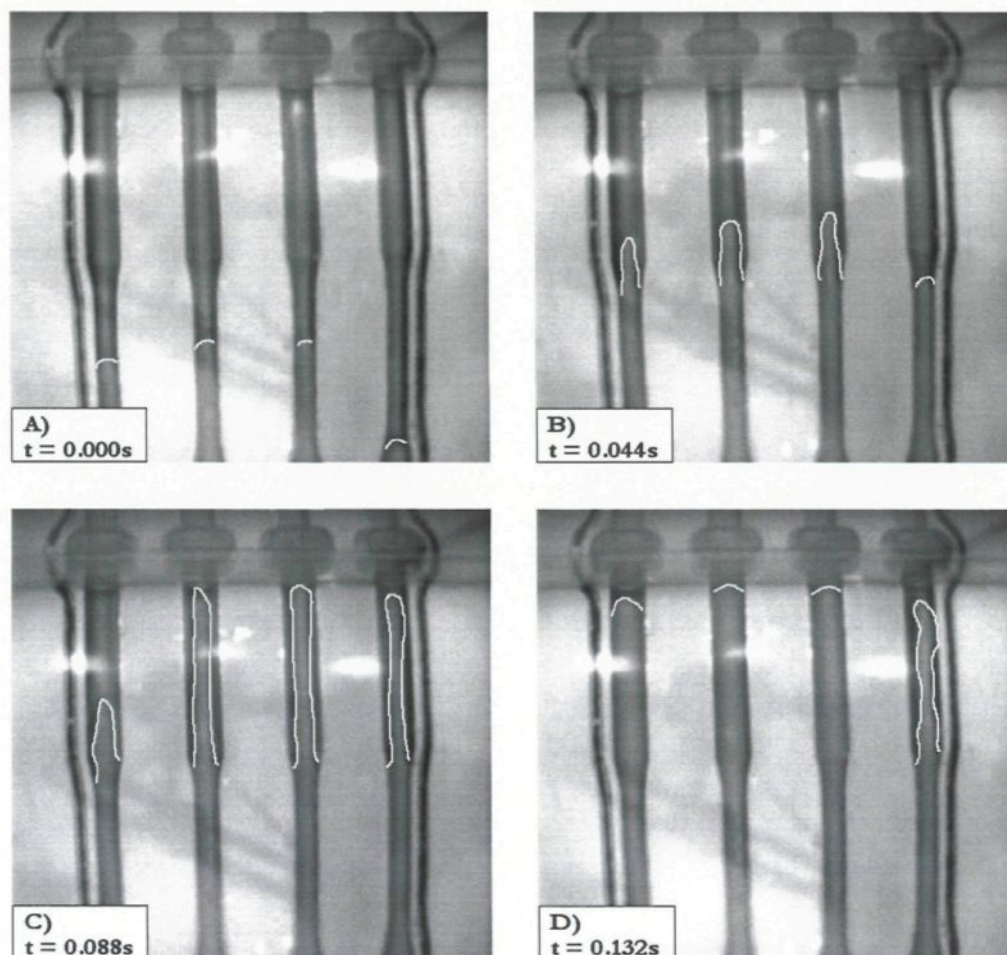


figure 51 : Injection de pâte de tomate à 0.1 m/s ($Re=17.1$)

Les données vidéos obtenues à cette vitesse d'injection ont servi principalement à établir des comparaisons avec l'injection d'aluminium semi-solide.

6.3. Résultats obtenus avec l'aluminium semi-solide

Le remplissage du moule avec de l'aluminium semi-solide n'est pas observable directement. Pour montrer le patron de remplissage, les résultats de remplissage partiel et les observations métallographiques sont utilisés.

La figure 52 montre un assemblage de quatre photos de remplissage partiel. Chacune de ces photos correspond à une pièce formée avec un arrêt différent. Il n'est pas possible de préciser le temps correspondant à chacune des images parce que celui-ci dépend de la variation de masse de la billette utilisée lors de l'injection. Ces quatre images permettent de percevoir le comportement de l'aluminium semi-solide lors du remplissage. L'AISS monte dans les éprouvettes et forme un jet lors du passage dans la section divergente. Ce jet vient frapper le fond de l'éprouvette et se déforme. La déformation est réalisée par une expansion au bout de l'éprouvette et un remplissage à rebours. Il arrive aussi que la colonne d'AISS se déforme solidement comme une corde. Elle plie et se tord jusqu'à occuper la largeur de l'éprouvette et cela cause la mise en contact de plusieurs surfaces quasi-solidifiées de la colonne. Une portion de la figure 52 C) illustrant ce phénomène est agrandie à la figure 53.

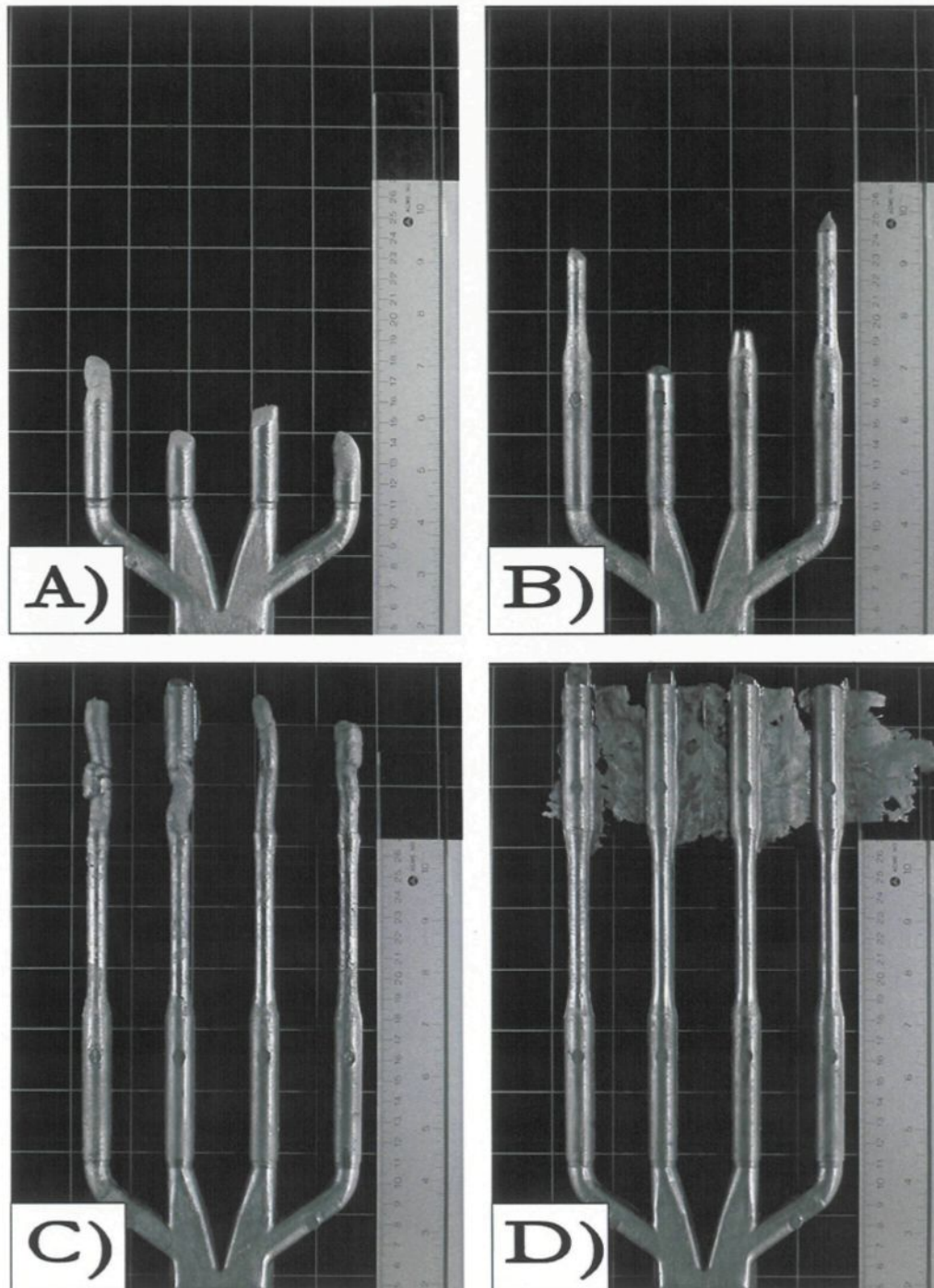


figure 52 : Assemblage de quatre photos de remplissage partiel avec de l'AlSS à 0.1 m/s ($Re=18.0$)

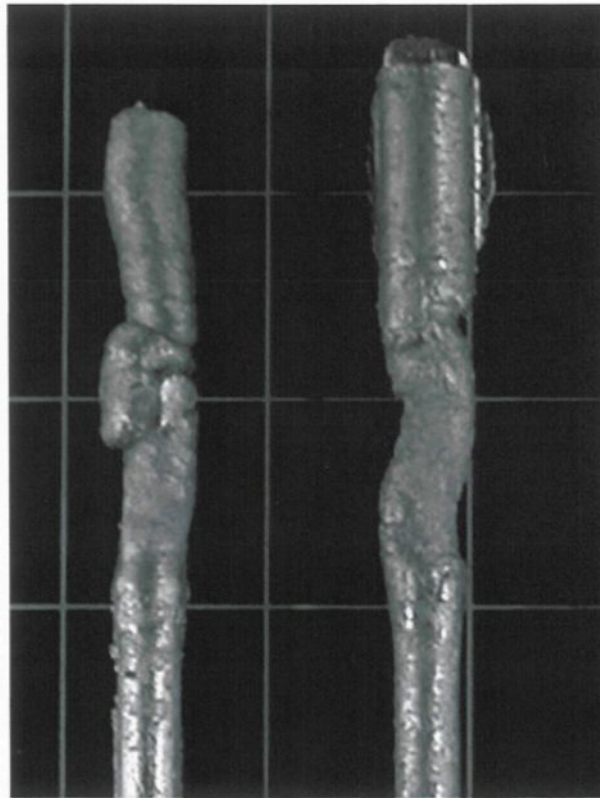


figure 53 : Détail des 2 éprouvettes de droite

Lors de l'injection, l'équilibre entre les quatre éprouvettes favorise les deux éprouvettes extérieures. Le front de remplissage est en avance par rapport au front de remplissage des éprouvettes du centre.

6.4. Observations métallographiques

Les pièces complètes et certaines pièces obtenues par remplissage partiel ont été analysées au laboratoire de métallographie du CTA. Des coupes longitudinales et transversales ont été réalisées sur les éprouvettes. L'observation microscopique de

ces surfaces a permis d'identifier des défauts métallurgiques et des indices de l'écoulement.

6.4.1. Défauts métallurgiques

Quelques défauts typiques de moulage sous pression ont été identifiés. Il s'agit d'inclusions d'oxydes (Al_2O_3) et de porosités. Les inclusions d'oxydes sont de petites tailles. Les amas d'oxydes sont localisés plutôt qu'étirés ou étendus (figure 54). Ils proviennent donc probablement directement du lopin, et ils ne semblent pas avoir été générés lors du remplissage.

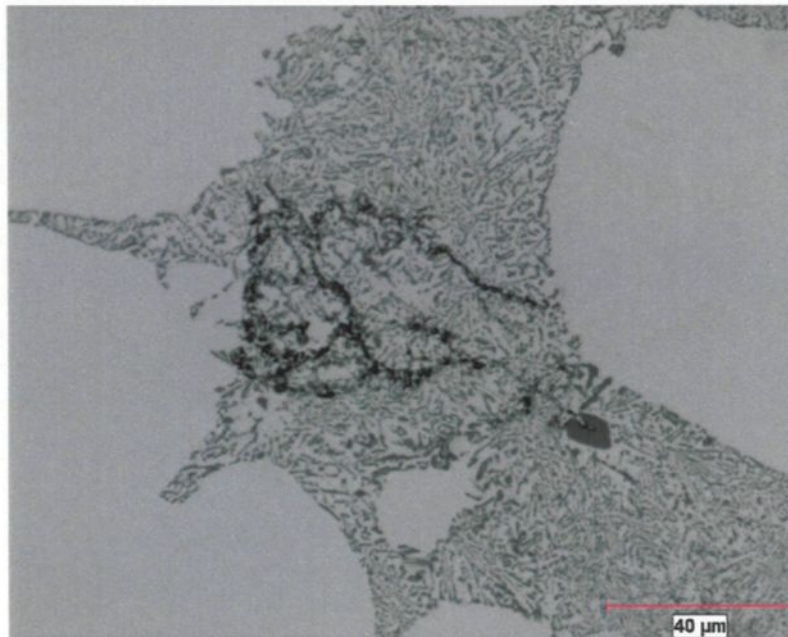


figure 54 : Film d'oxyde présent dans le haut du divergent d'une éprouvette

La distribution des porosités suggère qu'elles ont été formées par le retrait lors de la solidification et non par l'emprisonnement de gaz lors du remplissage. En effet, elles sont localisées dans la partie supérieure du divergent (figure 55).

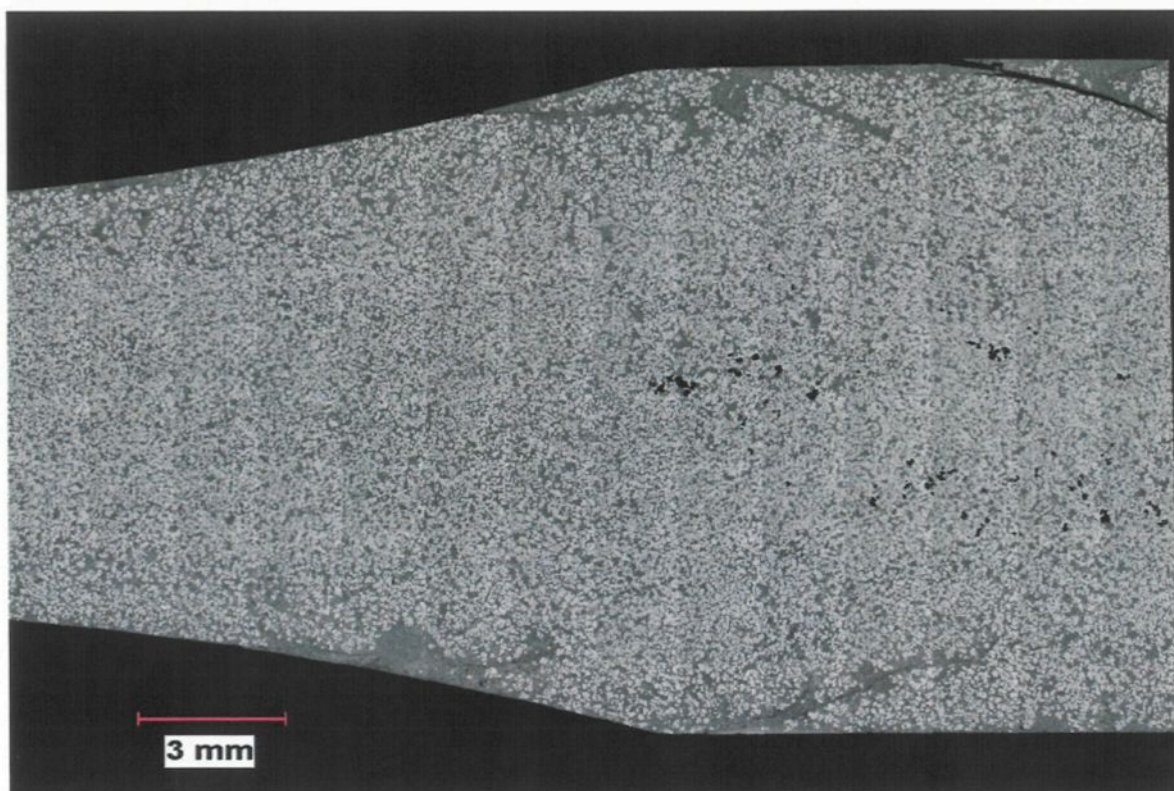


figure 55 : Divergent d'une éprouvette montrant une concentration de porosités dans le haut

Ce type de porosités est formé par la contraction du métal lors de la solidification. La section mince des éprouvettes se solidifiant en premier, les porosités ne peuvent pas être comblées par l'alimentation dans la phase d'intensification du moulage. Ces porosités sont très dommageables pour les propriétés mécaniques des pièces et elles peuvent expliquer en partie pourquoi certaines éprouvettes ont fracturé dans la section des mors lors d'essais de traction.

6.4.2. Signes de l'écoulement et défauts de remplissage

Il existe d'autres défauts dans la pièce qui, eux, peuvent être attribués à l'écoulement lors du remplissage. Il s'agit des écailles en surface et des fissures diagonales.

Les écailles en surfaces sont courtes et très minces, et elles se retrouvent principalement à la surface des échantillons pris dans la section des mors supérieurs et parfois à la surface des échantillons pris dans le bas du divergent ou dans le coude du système d'alimentation (figure 56).

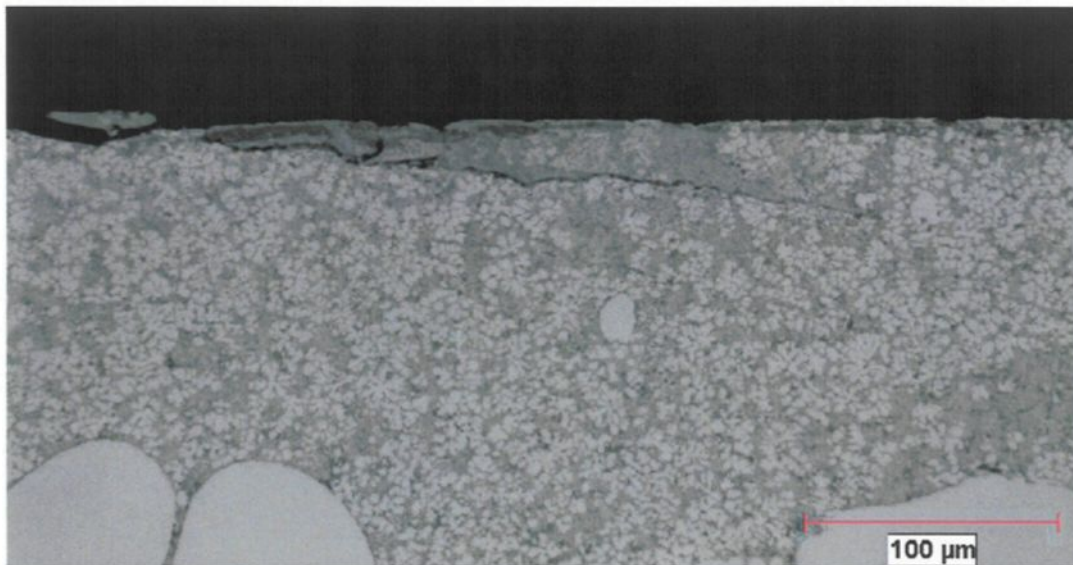


figure 56 : Coupe longitudinale de la section du mors supérieur d'une éprouvette, présence d'une reprise en écaille

Il semble que ces écailles sont des reprises et qu'elles ont été causées par le contact de métal liquide (dans l'écaille) avec du métal qui se serait préalablement solidifié

(plus au centre de la pièce). Le joint résultant est faible et s'ouvre lors de la contraction au refroidissement, créant la structure observée. L'échelle de ce défaut suggère que, bien que pouvant être un site d'initiation de fissure, il est d'une importance moindre.

Les fissures longitudinales ont plus d'importance quant à l'intégrité de la pièce. Celles-ci se retrouvent uniquement dans la section des mors et leur longueur est de l'ordre de plusieurs centimètres (figure 55, figure 57 et figure 58). Elles proviennent vraisemblablement de l'écoulement. Elles se seraient formées lors de l'écoulement à rebours alors qu'un front d'aluminium semi-solide s'écoulant vers le bas entre en contact avec une surface d'aluminium solidifiée. Un signe de cet écoulement relatif est la zone de ségrégation de la phase liquide, riche en eutectique, le long de l'interface.

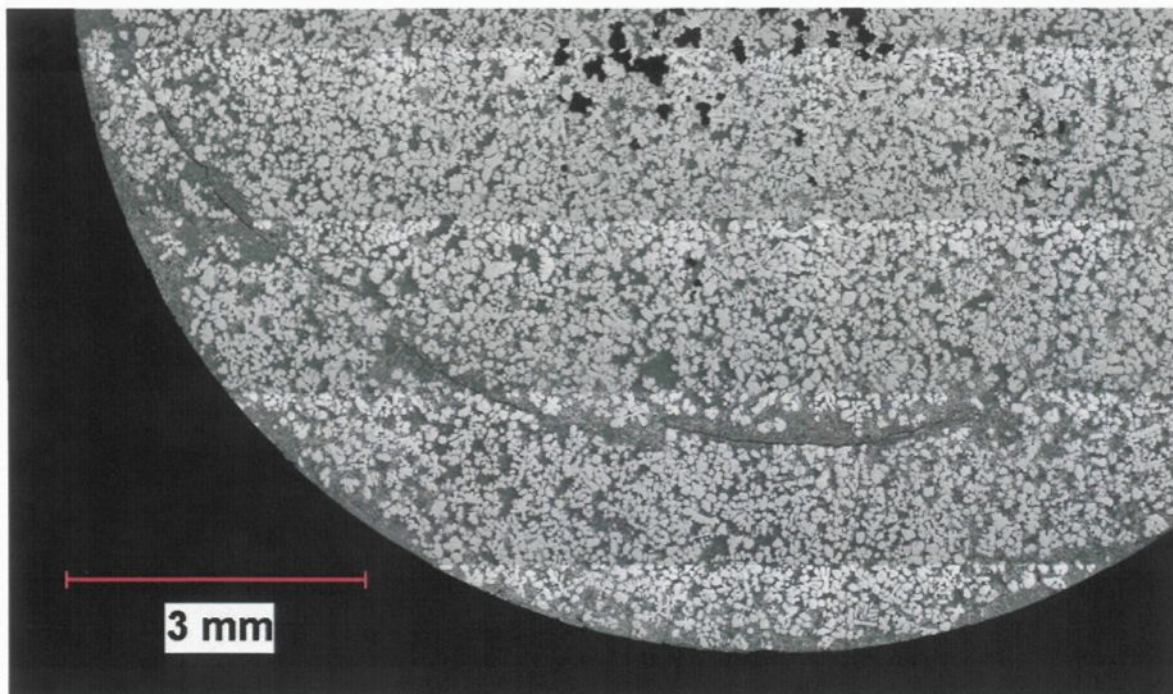


figure 57 : Longue fissure circonférentielle dans une section transversale d'une éprouvette

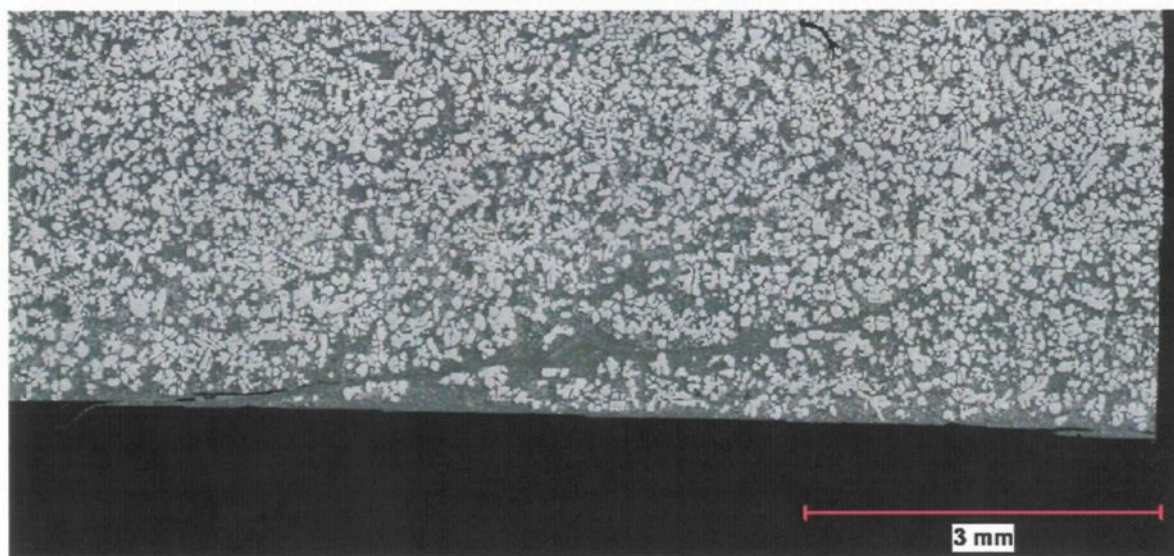


figure 58 : Fissure longitudinale dans le haut d'une éprouvette

Ces fissures se retrouvent sur la surface extérieure de l'éprouvette et à plusieurs positions longitudinales. Elles réduisent ainsi l'aire de la section de l'éprouvette pouvant supporter une charge en traction.

Les résultats des remplissages partiels montrent des déformations solides en forme de plis. Ces types de structures devraient être perçus dans la microstructure par des lignes cohérentes d'oxydes ou des fronts d'écoulements latéraux visibles. Ces défauts n'ont pas été identifiés lors des observations. Ceci suggère que le comportement de déformation, même s'il est très visqueux, reste dans le domaine fluide. Lorsque le mouvement du piston est interrompu dans les essais de remplissage partiel, l'écoulement arrête. La colonne d'aluminium semi-solide s'effondre alors et se solidifie, donnant les plis observés dans les pièces retirées de la presse.

Les défauts métallurgiques viennent donc supporter les explications de l'écoulement lors de l'injection d'aluminium semi-solide. Les fissures montrent des signes de mouvements relatifs dans l'aluminium qui se produisent lors du remplissage à rebours.

7. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Les résultats obtenus lors de la simulation des injections sont présentés. Les animations ont été décomposées et certaines images montrant la progression du remplissage ont été choisies. Puisque toutes les animations ont une référence commune, les étiquettes de temps absolus ont été utilisées. Les temps zéro correspondent au début du remplissage alors que l'aluminium semi-solide se trouve dans la section du biscuit.

7.1. Simulations de l'écoulement d'eau

Les simulations avec l'eau ont été réalisées avec le module laminaire et une viscosité constante de 0.001 Pa.s. Elles reproduisent l'injection à basse (0.05m/s) et à haute vitesse (0.3 m/s).

7.1.1. Eau à basse vitesse ($Re=8800$)

La simulation de l'injection d'eau à basse vitesse montre le fluide montant dans les éprouvettes (figure 59). L'équilibre entre les deux branches est presque égal, avec une légère avance à l'éprouvette du centre. Beaucoup de phénomènes dus à l'inertie sont présents. Cela est visible à la sortie de la section mince où l'eau forme

une colonne ascendante. Celle-ci monte dans la section des mors et elle ne commence à s'effondrer que lorsqu'elle est presque rendue au bout de l'éprouvette.

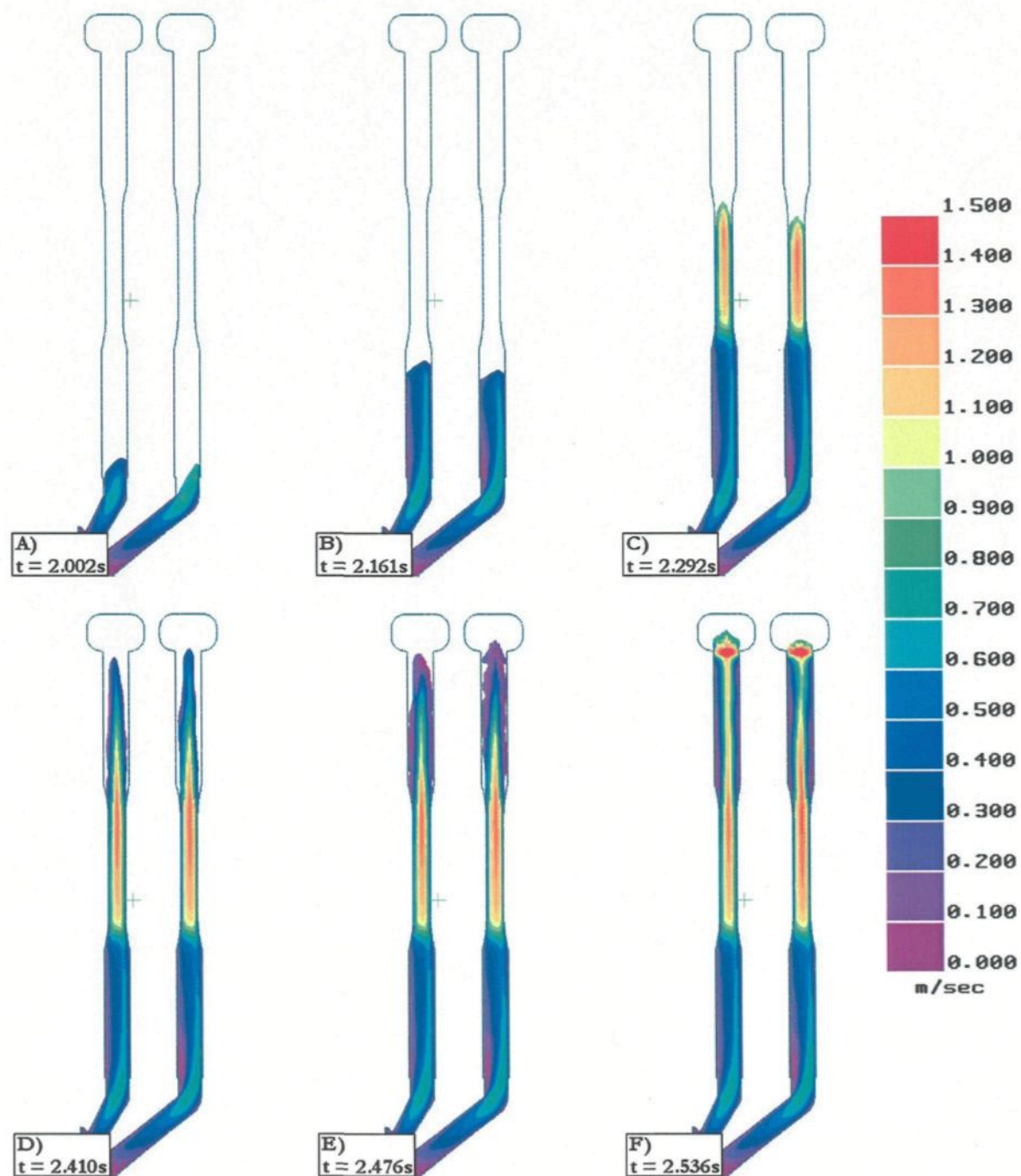


figure 59 : Simulation de l'injection d'eau à 0.05 m/s ($Re=8800$)

7.1.2. Eau à haute vitesse ($Re=52800$)

La simulation de l'injection à haute vitesse est très similaire à celle à basse vitesse. La principale différence est l'amplification des phénomènes inertiels (figure 60). Le jet dans la section des mors monte plus haut, entre en contact avec l'extrémité de l'éprouvette et l'écoulement amorce un remplissage à rebours. De plus, l'écoulement dans le coude suit la paroi extérieure avec plus d'intensité.

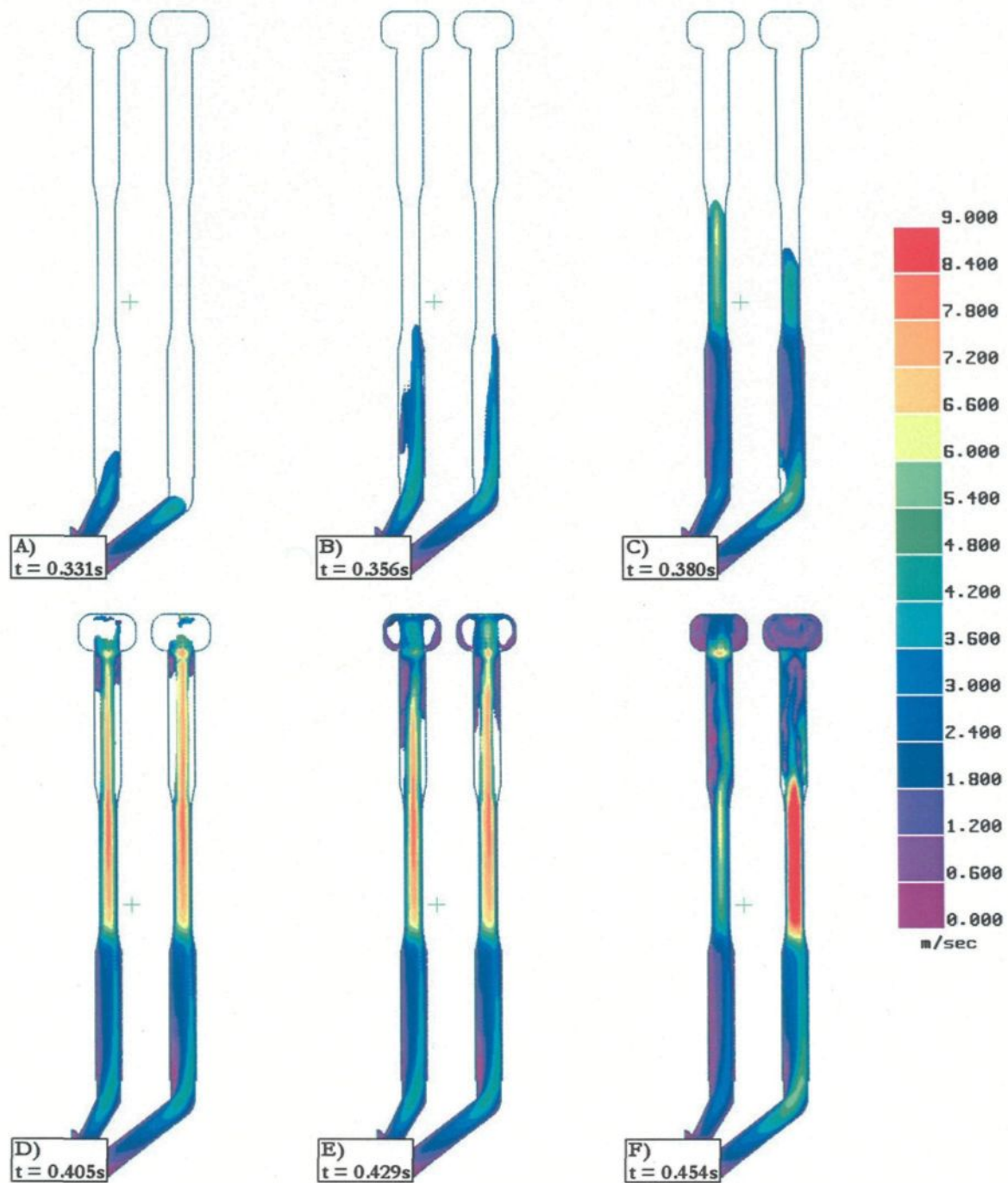


figure 60 : Simulation de l'injection d'eau à 0.3 m/s ($Re=52800$)

7.2. Simulations de l'écoulement de pâte de tomate

Les simulations avec la pâte de tomate présentent un fluide plus épais, mais conserve le même patron général qu'avec l'eau. Les simulations reprennent les vitesses utilisées lors de la modélisation physique, soit 0.05 et 0.3 m/s.

7.2.1. Pâte de tomate à basse vitesse ($Re=5.15$)

Lorsque la vitesse d'injection imposée est de 0.05 m/s, la simulation donne le résultat présenté à la figure 61. Le moule se remplit avec les deux branches pratiquement égales et un jet se forme à la sortie de la section mince des éprouvettes. Ce jet est très large et il s'appuie à la paroi (D). Par la suite, le remplissage se termine par un comportement mixte de remplissage à rebours et d'affaissement de la colonne.

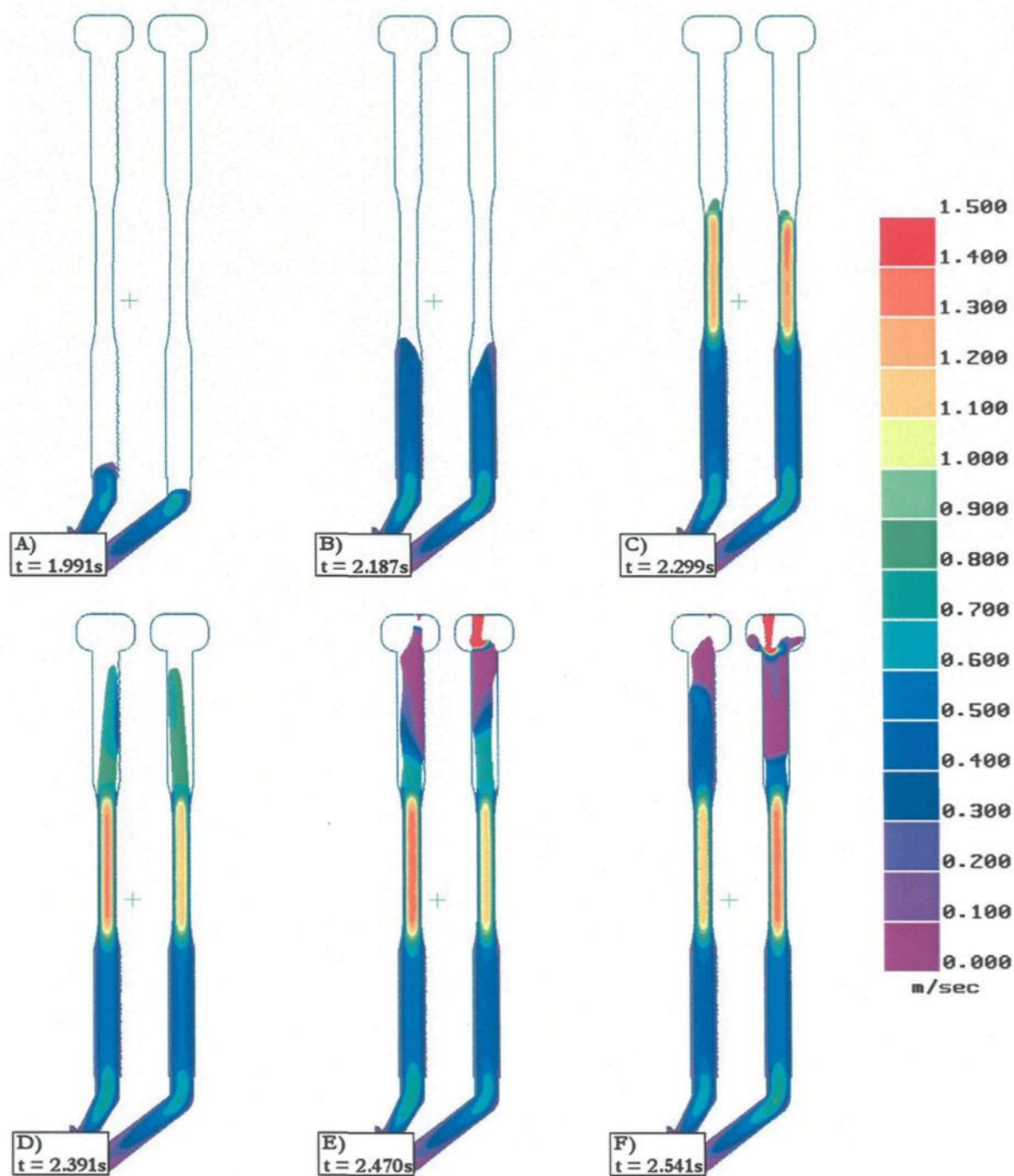


figure 61 : Simulation de l'injection de pâte de tomate à 0.05 m/s ($Re=5.15$)

7.2.2. Pâte de tomate à haute vitesse ($Re=114$)

En augmentant la vitesse à 0.3 m/s, les effets d'inertie sont plus importants. Le jet dans la section des mors de l'éprouvette vient frapper directement le fond. Un remplissage à rebours est initié et il se poursuit jusqu'à ce que l'éprouvette soit totalement remplie (figure 62).

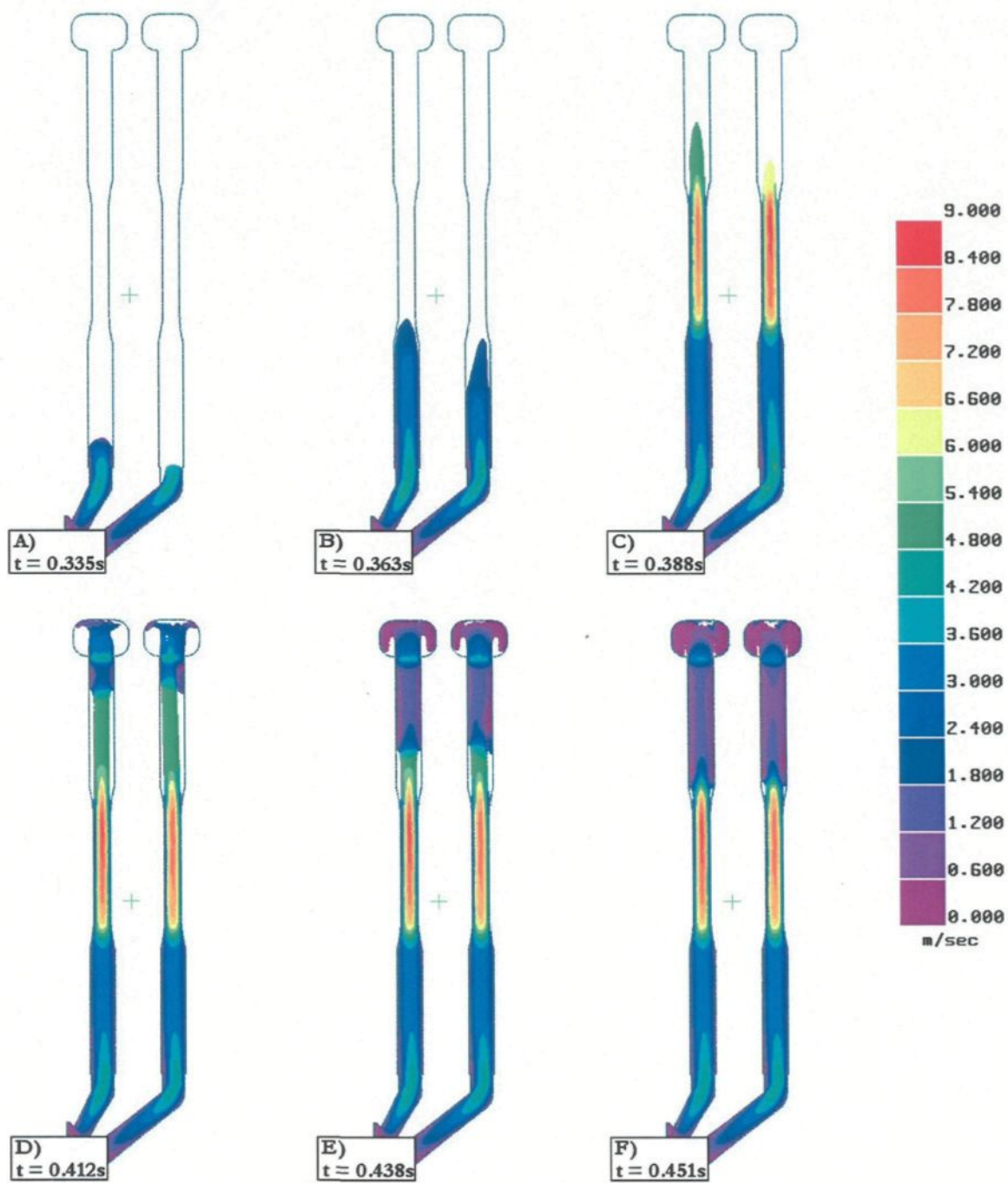


figure 62 : Simulation de l'injection de pâte de tomate à 0.3 m/s ($Re = 114$)

À la figure 63, un détail du coude extérieur est présenté. Il démontre bien le comportement à grande inertie et grande viscosité. La pâte de tomate suit la paroi extérieure du coude, laissant initialement un vide du côté intérieur. Le jet ainsi créé vient rejoindre la paroi intérieure plus haut, avant que le coude ne soit comblé (C). Ceci crée une poche d'air emprisonnée qui ne peut être évacuée que par le plan de joint.

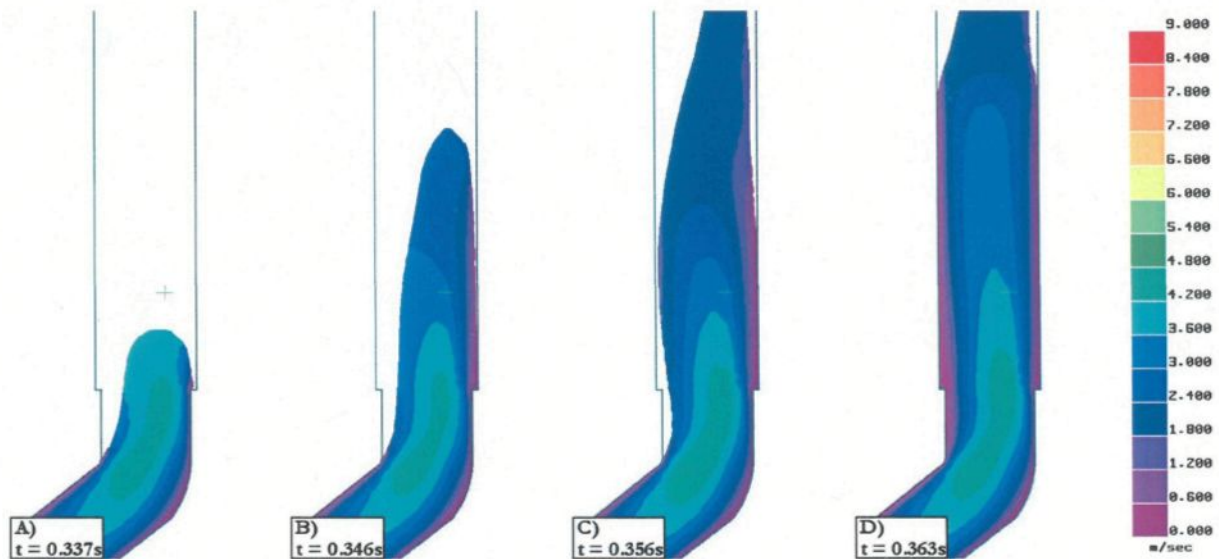


figure 63 : Simulation de l'injection de pâte de tomate à 0.3 m/s ($Re=114$, détail du coude extérieur)

Même une fois que le front est complètement passé l'effet du coude est perceptible. La distribution radiale de vitesse immédiatement après le coude est affectée (D). Les vitesses sont plus lentes à l'intérieur du coude et plus rapides à l'extérieur.

7.3. Simulation de l'écoulement d'aluminium semi-solide

La simulation avec l'aluminium semi-solide représente l'injection dans le vrai moule industriel. Pour comparer avec les pièces de remplissage partiel, la même vitesse d'injection a été utilisée, soit 0.1 m/s ($Re=18.0$).

Lors du remplissage, l'éprouvette du centre est remarquablement en avance sur celle de l'extérieur (figure 64). Les fronts de remplissage montent, forment un jet à la sortie de la section mince et viennent frapper le fond de l'éprouvette. Par la suite, le remplissage final de la section du mors des éprouvettes s'effectue par remplissage à rebours. Une fois que le remplissage à rebours est entamé, la section du mors se remplit aussi à partir du bas. Cela déplace vers le milieu de cette section la bulle d'air finalement emprisonnée. La grande viscosité du fluide est évidente dans l'épaisseur de la colonne d'aluminium semi-solide qui est très large. De plus, le remplissage du bas de la section du mors de l'éprouvette extérieure, ainsi que la déformation présente dans le haut de l'éprouvette (F) ne se produisent qu'avec des fluides de grande viscosité.

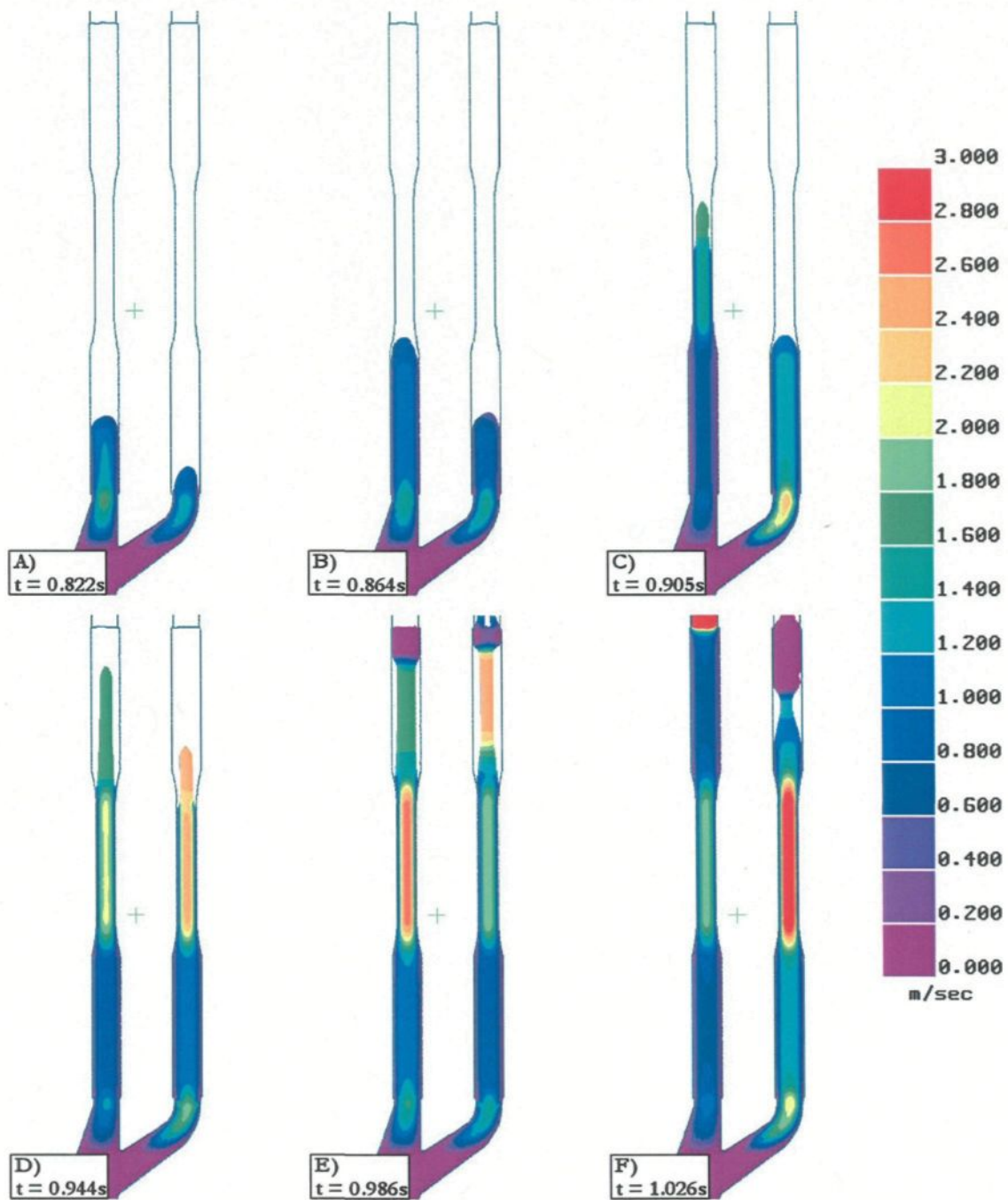


figure 64 : Simulation de l'injection d'aluminium semi-solide à 0.1 m/s
($Re=18.0$)

8. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats ont été présentés dans la section précédente. Il convient alors de faire des comparaisons critiques. La capacité des simulations à reproduire les écoulements observés expérimentalement et la performance de la pâte de tomate en tant que fluide analogue pour l'aluminium semi-solide sont évaluées.

8.1. Validité des résultats de modélisation numérique

La modélisation numérique a comme objectif de reproduire un phénomène expérimental dans un milieu virtuel. Pour que cet objectif soit réalisé, il doit y avoir concordance entre les résultats expérimentaux et les simulations. Cette comparaison est effectuée pour l'eau, pour la pâte de tomate et pour l'aluminium semi-solide.

8.1.1. Comparaison des résultats impliquant l'eau

La différence la plus marquante entre les simulations et les résultats expérimentaux impliquant l'eau, est l'absence de bulles dans les simulations. Ces bulles sont très présentes dans les vidéos à haute et à basse vitesse. Elles proviennent de l'air emprisonné par le piston dans le cylindre lors de l'injection. À basse vitesse, elles pénètrent dans le moule par vagues successives suite à un jeu

de pression dans le cylindre. Le nombre de Reynolds varie alors de 4000 dans le cylindre, à 8800 dans la section mince de l'éprouvette. À haute vitesse (Re vaut de 24000 à 52800), le fluide turbulent mélange les bulles uniformément tandis que les forces de cisaillement les brisent en entités beaucoup plus petites. Dans les simulations, puisque ni le cylindre ni la présence d'air ne sont modélisés, il est impossible que des bulles y soient générées.

De plus, le comportement de l'eau est trop cohérent dans les simulations. Même à haute vitesse le front d'écoulement n'est pas brisé, il n'y a pas de projections en gouttes, et le fluide forme un jet alors que les vidéos expérimentales montrent que toute la largeur de l'éprouvette est occupée lors de l'ascension de l'eau. Tous ces phénomènes peuvent être expliqués par la grande turbulence de l'écoulement expérimental, alors que les simulations ne tiennent compte que d'un écoulement laminaire.

Il s'agit ici de lacunes importantes au modèle représentant l'écoulement de l'eau. Toutefois, il n'y a pas d'objectif spécifique dans le projet concernant la simulation de l'eau. Ce fluide a surtout permis de mettre à l'essai les méthodes expérimentales, et d'avoir une visualisation générale des phénomènes se

produisant dans le moulage sous pression d'aluminium liquide. Cet aspect est discuté plus en détail à la section 8.2.1.

Pour bien représenter par simulation l'écoulement de l'eau dans le moule, il conviendrait d'appliquer un modèle de turbulence de l'écoulement. Il faudrait aussi simuler la présence d'air dans le moule pour reproduire la production de bulles et l'emprisonnement de gaz dû à l'écoulement extrêmement turbulent.

8.1.2. Comparaison des résultats impliquant la pâte de tomate

La concordance entre les résultats des expérimentations et les résultats des simulations de la pâte de tomate est la meilleure qui a été observée dans ce travail. Particulièrement à haute vitesse, les simulations reproduisent fidèlement le comportement de l'écoulement de la pâte de tomate dans les endroits critiques, soit la section du mors supérieur des éprouvettes et la section du coude extérieur du système de distribution.

À basse vitesse, la comparaison est avantageuse sans être parfaite. La différence la plus évidente est au niveau de la hauteur du jet de pâte de tomate. Lors des expérimentations, le jet atteint environ le tiers de la section des mors, tandis que les simulations le montrent qui monte jusqu'au bout de la section des mors avant de

s'affaïsser. Quelques sources d'explications possibles ont été identifiées. Il s'agirait principalement d'une surévaluation de la viscosité de la pâte de tomate dans la section des mors supérieurs dans les simulations. Cette surévaluation est due à la différence de temps de réaction de la viscosité entre l'expérimental et le modèle mathématique. Puisque le modèle mathématique est instantané, il ne peut représenter le temps potentiellement nécessaire à un recouvrement de viscosité lors d'une chute de taux de cisaillement. La viscosité augmente alors instantanément alors qu'en réalité, la variation est beaucoup moindre. Cette viscosité surévaluée donne donc de la rigidité au jet simulé de pâte de tomate, qui s'appuie sur la paroi et continue de monter au lieu de s'affaïsser (figure 61 C et D). La densité du fluide peut aussi avoir un effet important dans la hauteur et le comportement de la colonne de pâte de tomate. La modification de ces deux variables dans les simulations permettrait d'ajuster la hauteur à laquelle la colonne s'affaïsse. C'est donc une question de régime et cela peut être interprété par les nombres adimensionnels. De plus, la présence de glissement à la paroi peut avoir modifié la distribution radiale de la viscosité, le profil du front de remplissage et ainsi la hauteur de la colonne. Il est aussi possible que la simplification HIVISC nécessaire au calcul de l'écoulement ait une influence en limitant la diffusion du mouvement latéral. Il est à noter que, à part cette section, l'ensemble de

l'écoulement simulé de pâte de tomate à basse vitesse présente un comportement similaire à celui observé dans les résultats expérimentaux.

À haute vitesse, le comportement de la pâte de tomate dans les simulations est pratiquement identique à celui observé lors des remplissages expérimentaux. Les similarités dans le comportement sont évidentes dans le jet formé dans la section des mors des éprouvettes. Le jet mince s'élève, vient frapper le fond des éprouvettes, et la section des mors se remplit du haut vers le bas. Autant dans les simulations que dans l'expérimentation, des poches d'air se retrouvent emprisonnées à la base de la section des mors. De plus, le comportement de l'écoulement dans le coude est pratiquement identique. La pâte de tomate s'appuie sur la paroi extérieure et entre en contact avec la paroi intérieure à une certaine distance passé le coude, formant une poche d'air emprisonnée.

Il est alors considéré que la simulation de l'écoulement de pâte de tomate a été réussie. En combinant les résultats expérimentaux avec ceux des simulations, il est possible de percevoir le comportement du fluide tout le long du remplissage. Quelques améliorations au modèle sont nécessaires à basse vitesse, mais les résultats à haute vitesse démontrent que la reproduction de l'injection d'un fluide à deux phases est possible avec un modèle mathématique à une phase.

8.1.3. Comparaison des résultats impliquant l'aluminium semi-solide

La nature des résultats expérimentaux avec l'aluminium semi-solide fait en sorte que la comparaison directe est plus délicate. Il est toutefois possible d'utiliser les résultats de remplissage partiel et des métallographies pour discuter des simulations.

La principale différence entre les résultats de remplissages partiels et les simulations avec l'aluminium semi-solide est l'équilibre qui s'établit entre les éprouvettes intérieures et les éprouvettes extérieures. Les simulations montrent que les éprouvettes intérieures se remplissent en avance sur les éprouvettes extérieures alors que les résultats expérimentaux montrent le contraire. Cette situation suggère qu'il se produit un phénomène dans l'écoulement d'aluminium semi-solide menant à une variation de viscosité entre les éprouvettes. Une hypothèse a été émise suggérant qu'une variation de fraction solide dans les éprouvettes serait à l'origine de cette variation de viscosité. La quantification de la fraction solide dans diverses éprouvettes a validé cette hypothèse en montrant que la fraction solide dans les éprouvettes extérieures est inférieure d'environ 4%. Cette différence est due à la configuration géométrique qui favorise l'écoulement liquide (à densité moins élevée) dans les éprouvettes extérieures. Les particules solides ont

plus tendance à passer tout droit et à entrer dans les éprouvettes intérieures. Ce débalancement favorise l'écoulement dans les éprouvettes extérieures, qui est donc en avance. Ce type de phénomène ne peut pas être reproduit par le modèle à une phase de ProCAST. Toutefois, le modèle à deux phases développé par Frédéric Pineau [31] a reproduit la ségrégation entre les différentes éprouvettes. Ce phénomène est nuisible à la pièce ainsi moulée parce que les propriétés ne seront pas uniformes parmi les quatre éprouvettes. Il suffirait de concevoir un système de distribution totalement balancé pour s'assurer que ce défaut de remplissage ne se produise pas.

Malgré cette restriction, le modèle à une phase a bien réussi à reproduire le comportement de l'aluminium semi-solide. Le jet se forme adéquatement dans la section des mors, il vient frapper le fond de l'éprouvette, et le remplissage à rebours se produit. Il semble que l'aluminium semi-solide dans les simulations se comporte d'une manière plus liquide que dans les résultats de remplissage partiel. En effet, ceux-ci présentent des phénomènes de déformation solide qui ne sont pas reproduits par les simulations. Il ne semble pas être question d'une différence de viscosité, mais bien de comportement solide. Une simulation avec une fraction solide de 0.73 (et une viscosité supérieure de deux ordres de grandeur) a montré la même absence de déformation des colonnes d'aluminium semi-solide. Il semble

alors qu'il faudrait ajouter aux simulations la capacité de réaliser des déformations solides. Malgré cela, l'inertie et la grande viscosité du fluide ont été bien simulées. En témoignent le comportement dans le coude extérieur du système de remplissage, la forme des jets dans la section des mors, et le remplissage final de cette section par le haut et par le bas simultanément. Ces trois indices concordent bien avec les observations des pièces moulées en remplissage partiel.

8.1.4. Qualité générale de la simulation

En bref, les résultats obtenus par simulation sont satisfaisants. Pour les deux fluides non-newtoniens avec un écoulement laminaire, la reproduction du comportement de l'écoulement durant le remplissage a été réalisée. Le régime d'écoulement est fidèle, montrant l'équilibre entre l'inertie et la viscosité du fluide. Quelques ajustements pourraient améliorer la précision des résultats dans chacun des modèles mathématiques, mais les tendances du comportement sont identifiées. Le modèle à une phase a donc réussi à reproduire l'écoulement des fluides à deux phases.

Cependant, il reste peu de marge de manoeuvre pour améliorer les simulations dans ProCAST. Pour pousser le programme plus intensément, il faudrait modifier les modes de calcul et avoir accès au code informatique. Ceci permettrait par

exemple de mettre en oeuvre un module de déformation solide avec un modèle mathématique de Herschel-Bulkley reproduisant le seuil de cisaillement.

Les simulations dans ProCAST sont donc considérées comme un premier niveau d'évaluation. Elles permettent de visualiser l'écoulement d'un fluide dans diverses géométries et avec plusieurs paramètres d'opération. Son principal avantage est le temps de calcul nécessaire relativement court. Un second niveau d'évaluation sera nécessaire par la suite. Cela pourrait être l'utilisation d'un modèle mathématique à deux phases ou l'utilisation d'un fluide analogue dans la modélisation physique.

8.2. Pertinence de la modélisation physique

Dans cette section, il est discuté de l'utilisation des fluides analogues pour reproduire le comportement de l'aluminium dans le moulage sous pression. Un commentaire est fait sur l'utilisation de l'eau à la place de l'aluminium liquide puis la performance de la pâte de tomate en tant qu'analogue pour l'aluminium semi-solide est évaluée.

8.2.1. Eau vs. aluminium liquide

L'eau est généralement reconnue comme un bon analogue pour représenter l'écoulement de l'aluminium liquide. Ceci est dû à la viscosité des deux fluides qui

est presque identique. Dans le présent travail, l'eau a permis de voir comment le moule se remplirait avec de l'aluminium liquide. La principale observation est que le remplissage se fait de façon très brutale, à grande vitesse et avec beaucoup de turbulence. Surtout qu'en moulage d'aluminium liquide, les vitesses d'injection utilisées sont plus grandes que celles qui ont été utilisées ici pour le moulage semi-solide. Alors, le comportement de l'aluminium liquide serait encore plus agité que celui observé dans l'eau à une vitesse d'injection de 0.3 m/s. Le front de remplissage étant très turbulent, beaucoup d'air est emprisonné et cela se répercute dans la grande quantité de porosités présentes dans les pièces moulées en aluminium liquide. Il est aussi intéressant de voir que, à de grandes vitesses d'injection, l'air emprisonné dans le cylindre par le piston se retrouve sous la forme d'une multitude de petites bulles dans le fluide. Si ces bulles ne peuvent être évacuées, elles causeront aussi des porosités dans la pièce.

8.2.2. Pâte de tomate vs. aluminium semi-solide

L'utilisation de pâte de tomate en tant que fluide analogue à l'aluminium semi-solide est une nouveauté. Il convient alors d'évaluer sa performance dans le domaine.

Le comportement général de la pâte de tomate est très similaire à celui de l'aluminium semi-solide. Lorsqu'on compare les deux à une vitesse d'injection de 0.1 m/s, on perçoit le même comportement de déformation du jet. Lorsque celui-ci arrête de monter, il a plus tendance à se déformer dû à l'apport de fluide venant du bas que par l'affaissement de la colonne. L'aluminium semi-solide semble transporter plus d'inertie puisque le jet touche le fond de l'éprouvette, alors que la pâte de tomate arrête juste avant. Les replis sont plus évidents dans les remplissages partiels d'aluminium semi-solide puisqu'il peut se solidifier.

Toutefois, il n'y a pas eu de phénomène de ségrégation de la fraction solide observé entre les éprouvettes extérieures et intérieures avec la pâte de tomate. La structure interne particulière de la pâte de tomate doit être à la source de cette différence de comportement.

L'inertie de l'écoulement a été bien reproduite. La ressemblance entre les deux écoulements peut s'expliquer par un régime très similaire. En effet, en utilisant les modèles mathématiques pour exprimer la viscosité de chacun des fluides, les nombres de Reynolds sont de 17 pour la pâte de tomate et de 18 pour l'aluminium semi-solide. Ils sont donc tous les deux dans un régime très laminaire avec une vitesse d'injection de 0.1 m/s.

De plus, les avantages pratiques de l'utilisation de la pâte de tomate sont nombreux. Elle est facilement disponible en quantité importante, elle est d'emploi aisé à la température ambiante et elle se nettoie sans nécessiter de mesures particulières. Ces avantages pratiques, combinés à sa performance technique, font que la pâte de tomate est un bon fluide analogue à l'aluminium semi-solide.

Ces considérations sur la modélisation physique sont d'autant plus importantes que celle-ci est un outil efficace pour mettre au point des méthodes d'opération optimales. Avec une géométrie de moule donnée, l'utilisation d'un fluide analogue en modélisation physique permet de mettre à l'essai plusieurs paramètres très rapidement. Par exemple, une dizaine de vitesses d'injection différentes peuvent être essayées dans une journée et les résultats peuvent être filmés pour l'analyse. La même évaluation de paramètres réalisée par simulation prendrait quelques semaines à compléter.

9. CONCLUSIONS

L'ensemble des expérimentations et des simulations qui ont été menées dans le cadre de ce travail a permis de trouver dans quelles limites l'utilisation d'un modèle à une phase permet de reproduire le comportement de l'aluminium semi-solide lors de l'injection dans le moulage sous pression. La modélisation physique avec la pâte de tomate a aussi été mise à l'essai. Sa pertinence et ses performances ont été évaluées.

Les simulations de l'écoulement de la pâte de tomate se sont avérées très représentatives des résultats expérimentaux. L'environnement de simulation ainsi validé a servi de tremplin pour mettre en oeuvre un modèle mathématique isotherme à une phase pour simuler l'écoulement de l'aluminium semi-solide. Ces simulations ont été comparées avec des résultats expérimentaux provenant d'essais de remplissage partiel et d'observations métallurgiques. Ces comparaisons ont mis en valeur les qualités et les faiblesses du modèle mathématique. L'inertie du fluide et la mode de remplissage ont été bien reproduits. Les capacités du logiciel de simulation n'incluent pas la déformation solide ou la ségrégation de fraction solide qui peut se produire dans l'écoulement. La simulation dans ProCAST est donc recommandée comme première approche à la conception de moule. Elle peut

servir à déterminer le mode de remplissage du moule dépendamment de sa géométrie et des paramètres d'opération.

Dans la modélisation physique, la pâte de tomate a été choisie comme fluide analogue pour ses qualités pratiques et son comportement rhéologique proche de celui de l'aluminium semi-solide. L'injection de pâte de tomate dans la réplique de moule en acrylique a permis la visualisation de la phase de remplissage dans le moulage sous pression. Les vidéos ainsi obtenues ont fourni une grande quantité d'information qui a permis de valider le comportement de la pâte de tomate avec celui de l'aluminium semi-solide. De plus, cet écoulement a été la base de la validation de l'environnement de simulation dans ProCAST. Les essais expérimentaux par modélisation physique se sont avérés une excellente méthode pour mesurer rapidement l'effet de différentes vitesses et séquences d'injection.

L'information quant à l'écoulement de l'aluminium semi-solide a été obtenue grâce à une série de remplissages partiels et à des indices provenant de l'observation métallographique d'échantillons. Les remplissages partiels ont montré comment le moule se remplit avec de l'aluminium semi-solide. Les observations portées sur les échantillons métallographiques ont permis d'extrapoler le mode de remplissage sur des pièces moulées entières. Ainsi, la validité des simulations a pu être

confirmée, ainsi que ses limites. Les observations métallographiques ont aussi permis de déterminer que les éprouvettes de traction sont de mauvaise qualité parce qu'elles ont de la porosité de retrait dans la section des mors supérieurs et parce qu'elles présentent des fractures longitudinales qui sont le résultat du mode de remplissage.

10. RECOMMANDATIONS

Il a été évalué que l'utilisation d'un modèle à une phase dans la simulation d'un écoulement à deux phases possède certains avantages et certaines limites. Voici comment il est recommandé d'utiliser les outils validés dans ce travail pour réaliser une meilleure conception de moule. La performance idéale sera obtenue par une combinaison des divers outils disponibles.

Le premier niveau d'évaluation d'un moule correspond aux simulations à l'aide d'un modèle à une phase. Il est ainsi possible de déterminer un remplissage efficace en contrôlant la géométrie du moule et du système d'alimentation et de distribution. Le mode de remplissage de l'aluminium semi-solide est évalué afin d'éviter la création de cavités dans la pièce moulée. Les événements et réservoirs de trop plein sont placés pour évacuer l'air, les impuretés et les fronts d'écoulement. Il convient d'avoir une configuration de géométrie symétrique pour éviter la ségrégation de fraction solide entre les différents éléments du moule. Ceci pourra être vérifié à l'aide d'une simulation utilisant un modèle à deux phases. L'utilisation des modèles à deux phases sera toutefois restreinte encore durant plusieurs années à cause de leur disponibilité réduite et de leur coût en ressources de calcul plus important que pour les modèles à une phase. Une fois que la géométrie a pu être finalisée, la modélisation physique permet de trouver des

paramètres d'opération idéaux en moins de temps. La séquence d'injection peut être déterminée pour obtenir le bon mode de remplissage. Tout ceci permettra de fabriquer un moule prêt pour l'aluminium semi-solide, de ne pas avoir à faire de modifications subséquentes sur ce moule et de minimiser le temps nécessaire à la détermination des paramètres de moulage idéaux.

Dans le cas du moule pour les éprouvettes de traction discuté dans ce travail, quelques modifications à la géométrie peuvent être recommandées. Il convient toutefois d'éliminer préalablement le problème de porosités de retrait dans la section des mors supérieurs des éprouvettes. Le système de distribution pourrait être grandement amélioré avec des divisions symétriques à chaque embranchement comme un exemple est présenté à la figure 65. Il n'y aurait alors aucune ségrégation due à la configuration du moule. L'agrandissement des rayons de courbure permet aussi de réduire les effets d'inertie dans les coudes. Un autre point important est de ne jamais augmenter la section. En conservant une même aire de section ou en la diminuant, les problèmes reliés à l'écoulement dans une cavité sont facilement éliminés. Ceci n'est toutefois pas possible dans la section des mors supérieurs où la géométrie de l'éprouvette ne peut être modifiée. Il faudrait alors ajouter des événements, en plus de ceux au bout des éprouvettes, à la hauteur de la

dernière section remplie par l'aluminium semi-solide tel que déterminé par les simulations.

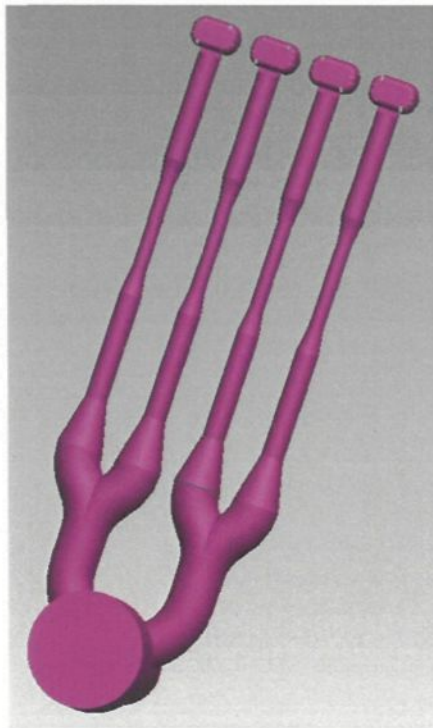


figure 65 : Exemple d'amélioration du système de distribution du moule pour éprouvettes ASTM

Ces modifications réduiront grandement les problèmes liés au remplissage du moule pour éprouvettes ASTM. Il sera alors possible de se concentrer sur les paramètres d'opération pour obtenir un remplissage adéquat dans la section des mors. D'un point de vue de la dynamique des fluides, une vitesse plus lente serait idéale car cela éliminera les poches d'air dans les éprouvettes. Cela est toutefois contradictoire avec les contraintes métallurgiques, où un remplissage trop lent engendre de la solidification avant que le moule ne soit rempli totalement. Un

compromis doit être atteint, quitte à utiliser des vitesses d'injection rapides et de prévoir les évents et réservoirs de trop plein selon le mode de remplissage prévu.

11. SUGGESTIONS POUR LA POURSUITE DU PROJET

Voici quelques suggestions qui pourraient améliorer la qualité des simulations. Elles touchent le modèle mathématique utilisé, l'acquisition de données expérimentales et le développement des nombres adimensionnels.

Le modèle mathématique qui a été utilisé provient de la littérature. Il conviendrait de développer un modèle spécifiquement pour l'aluminium semi-solide tel qu'il est obtenu par le procédé SEED. Ceci implique de caractériser cet aluminium dans un rhéomètre pouvant opérer en régime transitoire à des taux de cisaillement entre 100 s^{-1} et 2000 s^{-1} . Le modèle rhéologique ainsi obtenu pourra être utilisé avec plus de certitude.

Pour augmenter la qualité des vidéos réalisées en modélisation physique, l'acquisition d'une nouvelle caméra plus performante est suggérée. Par exemple, un modèle possédant quatre fois plus de pixels que celui qui a été utilisé aurait une résolution linéaire deux fois plus grande. Cette amélioration permettrait de mieux définir l'image vidéo obtenue. Un avantage de cette meilleure résolution est que les profils de vitesse à l'intérieur des éprouvettes pourraient être précisément visualisés et il serait alors possible de les comparer avec ceux obtenus dans les simulations.

Au niveau des simulations, il serait intéressant de poursuivre l'utilisation des expressions des nombres adimensionnels établies dans ce travail. Par exemple, une cartographie des divers types de patrons de remplissages pourrait être réalisée pour un fluide non-newtonien, en fonction des nombres de Reynolds et de Bingham. Une expression exacte de ces nombres permettrait d'identifier les domaines où se produisent les différents patrons de remplissage. Ces limites ne devraient pas changer lors de la substitution du fluide par un autre dans la simulation.

La modélisation numérique du remplissage du moule d'éprouvettes de traction pourrait être poursuivie. Les simulations réalisées avec l'eau pourraient être améliorées en insérant les composantes de turbulence dans le modèle. Ceci donnerait une meilleure reproduction du comportement de l'eau au nombre de Reynolds appropriés. Pour l'AISS, le principal facteur à ajouter aux modélisations serait le transfert de chaleur à la paroi du moule et la solidification subséquente du fluide.

L'effet du glissement à la paroi pourrait aussi être exploré. Les simulations réalisées dans le cadre de ce travail comportent toutes une condition de non glissement à la paroi. Le distributeur du logiciel ProCAST suggère d'inclure une

certaine quantité de glissement à la paroi lors de la simulation d'opérations de remplissage de moule. Cette quantité n'est pas spécifiée ou contrôlée explicitement dans le logiciel ProCAST, ce qui rend sa mise en oeuvre très délicate. Un maillage comportant des éléments de taille réduite à la paroi, comme dans le présent travail, vient minimiser cet effet. Il pourrait être intéressant de quantifier expérimentalement le glissement à la paroi et de calibrer les paramètres de glissement de ProCAST pour permettre un élargissement du maillage et ainsi une réduction du temps de calcul.

Bibliographie

1. Spencer, D.B., R. Mehrabian, and M.C. Flemings, *Rheological behavior of Sn-15 percent Pb in the crystallization range*. Metallurgical Transactions, 1972. **3**(7): p. 1925-1932.
2. Flemings, M.C., *Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State*. Metallurgical Transactions A, 1991. **22A**(5): p. 957-981.
3. Kirkwood, D.H., *Semisolid metal processing*. International Materials Reviews, 1994. **39**(5): p. 173-189.
4. Fan, Z., *Semisolid metal processing*. International Materials Reviews (UK), 2002. **47**(2): p. 49-85.
5. Atkinson, H.V., *Modelling the semisolid processing of metallic alloys*. Progress in materials science, 2005. **50**: p. 341-412.
6. Sigworth, G.K., *Rheological properties of metal alloys in the semi-solid state*. Canadian Metallurgical Quarterly, 1996. **35**(2): p. 101-122.
7. Vinarcik, E.J., *Defects encountered in semi-solid metalworking*. Light Metal Age, 2000. **58**(9-10): p. 22,24,26-27.
8. Gabathuler, J.-P., H.J. Huber, and J. Erling, *Specific properties of produced parts using the thixocasting process*. Metallurgia Italiana, 1994. **86**(12): p. 609-615.
9. Basner, T.G. *Rheocasting of semi-solid A357 aluminum*. in SAE 2000 World Congress. 2000. Detroit, MI, USA: Society of Automotive Engineers.
10. Suery, M., et al., *Mise en forme des alliages métalliques à l'état semi-solide*. 2002, Paris: Lavoisier. 271.
11. Basner, T.G., R.D. Pehlke, and A.K. Sachdev. *Fatigue behavior of semi-solid formed A357-T6 aluminum*. in SAE 2001 World Congress. 2001. Detroit, Michigan, USA: Society of automobile engineering.
12. Park, C., et al., *Mechanical and corrosion properties of rheocast and low-pressure cast A356-T6 alloy*. Materials Science and Engineering A, 2005. **391**(1-2): p. 86-94.
13. Yurko, J.A., A.R. Martinez, and M.C. Flemings, *Commercial Development Of The Semi Solid Rheocasting (SSRTM) Process*. Metallurgical Science and Technology, 2003. **21**(1): p. 10-15.
14. Chayong, S., H.V. Atkinson, and P. Kapranos, *Thixoforming 7075 aluminium alloys*. Materials Science and Engineering A, 2005. **390**(1-2): p. 3-12.

15. Saklakoglu, N., et al., *Mechanical properties and microstructural evaluation of AA5013 aluminum alloy treated in the semi-solid state by SIMA process*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **148**(1): p. 103-107.
16. Pan, Q.Y., D. Apelian, and A.N. Alexandrou, *Yield Behavior of Commercial Al-Si Alloys in the Semisolid State*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004. **35**(6): p. 1187-1202.
17. Doutre, D., et al., *SEED : A new process for semi-solid forming*. Canadian Metallurgical Quarterly, 2004. **43**(2): p. 265-272.
18. Martinez, R.A. and M.C. Flemings, *Evolution of Particle Morphology in Semisolid Processing*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005. **36**(8): p. 2205-2210.
19. Findon, M.M., *Semi-solid slurry formation via liquid metal mixing*, in *Materials Science and Engineering*. 2003, Worcester Polytechnic Institute. p. 109.
20. Yurko, J.A. and M.C. Flemings, *Rheology and microstructure of semi-solid aluminum alloys compressed in the drop-forge viscometer*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002. **33A**(8): p. 2737-2746.
21. NGuyen, T.G., D. Favier, and M. Suery, *Theoretical and Experimental Study of the Isothermal Mechanical Behavior of Alloys in the Semi-Solid State*. International journal of plasticity, 1994. **10**(6): p. 663-693.
22. Orgeas, L., et al., *Modelling of semi-solid processing using a modified temperature-dependent power-law model*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2003. **11**(4): p. 553-74.
23. Paradies, C.J., et al. *Modeling the rheology of semisolid metal alloys during die casting*. in *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes - VIII*. 1998. San Diego, California.
24. Pan, Q.Y. and D. Apelian. *Yield Stress of Al Alloys in the Semi-Solid State*. in *6th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 2000. Turin, Italy: Edimet.
25. Bardinet, F., A.N. Alexandrou, and W. Loué. *Numerical Simulation of Die Filling in Semisolid Metal Processing*. in *Light Metals*. 1997. Orlando, Florida, USA: Minerals, Metals and Materials Society / AIME.
26. Burgos, G.R., A.N. Alexandrou, and V.M. Entov. *Time-dependent rheology of semisolid metal suspensions*. in *Light Metals*. 1999. San Diego, CA, USA: Minerals, Metals and Materials Society / AIME.
27. Alexandrou, A.N., G.R. Burgos, and V.M. Entov. *Modeling of semisolid metal casting*. in *3rd International Symposium on Materials Processing in the Computer Age (as held at the 2000 TMS Annual Meeting)*. 2000. Nashville, TN, USA: Minerals, Metals and Materials Society / AIME.

28. Papanastasiou, T.C., *Flows of materials with yield*. Journal of Rheology, 1987. **31**(5): p. 385-404.
29. Kumar, P., C.L. Martin, and S. Brown, *Shear Rate Thickening Flow Behavior of Semisolid Slurries*. Metallurgical Transactions A, 1993. **24A**(5): p. 1107-1116.
30. Le Corre, S., et al. *Two-phase approach for solidification problems: modeling the mushy zone deformation*. in *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes* - X. 2003. Destin, Florida, USA.
31. Pineau, F. *Two-phase predictive finite-element flow model for semi-solid slurries*. in *Computational modeling of material, minerals and metals processing*. 2001. San Diego, CA, USA: TMS.
32. Koke, J., et al. *A study on the die filling behavior with semi-solid fluids*. in *6th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 2000. Turin, Italy: Edimet.
33. Lee, J.-C., H.-K. Seok, and H.-I. Lee. *Visualization of the thixotropic fluid flow*. in *6th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 2000. Turin, Italy: Edimet.
34. Modigell, M., et al. *Isothermal and non-isothermal die filling experiments to determine model parameters*. in *8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 2004. Limasol, Cyprus.
35. Turng, L.S. and K.K. Wang, *Rheological Behaviour and Modelling of Semi-Solid Sn--15Pb Alloy*. Journal of Materials Science, 1991. **26**(8): p. 2173-2183.
36. Joly, P.A. and R. Mehrabian, *The rheology of a partially solid alloy*. Journal of Materials Science, 1976. **11**(8): p. 1393-1418.
37. Laxmanan, V. and M.C. Flemings, *Deformation of Semisolid Sn--15% Pb Alloy*. Metallurgical Transactions A, 1980. **11A**(12): p. 1927-1937.
38. Brabazon, D., D.J. Browne, and A.J. Carr, *Experimental investigation of the transient and steady state rheological behaviour of Al-Si alloys in the mushy state*. Materials Science and Engineering A, 2003. **325**(1-2): p. 69-80.
39. Zoqui, E.J., et al., *Morphological evolution of SSM A356 during partial remelting*. Materials Science and Engineering A, 2002. **325**(1-2): p. 35-53.
40. Yang, X., Y. Jing, and J. Liu, *The rheological behavior for thixocasting of semi-solid aluminum alloy (A356)*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **130**: p. 569-573.
41. Quaak, C.J., L. Katgerman, and W.H. Kool. *Viscosity evolution of partially solidified aluminium slurries after a shear rate jump*. in *4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 1996. Sheffield, UK: University of Sheffield.

42. Kumar, P., C.L. Martin, and S. Brown, *Constitutive Modeling and Characterization of the Flow Behavior of Semi-Solid Metal Alloy Slurries. I. The Flow Response*. Acta Metall. Mater., 1994. **42**(11): p. 3595-3602.
43. Modigell, M. and J. Koke, *Time-dependent rheological properties of semi-solid metal alloys*. Mechanics of Time-Dependent Materials, 1999. **3**(1): p. 15-30.
44. Loué, W., S. Landkroon, and W.H. Kool, *Rheology of Partially Solidified AlSi7Mg0.3 and the Influence of SiC Additions*. Materials Science and Engineering A, 1992. **151**(2): p. 255-262.
45. Kapranos, P., D.H. Kirkwood, and M.R. Barkhudarov. *Modeling of Structural Breakdown During Rapid Compression of Semi-Solid Alloy Slugs*. in *5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. 1998. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines.
46. Koke, J. and M. Modigell, *Flow behaviour of semi-solid metal alloys*. Journal of Non Newtonian Fluid Mechanics, 2003. **112**(2-3): p. 141-160.
47. White, F.M., *Fluid Mechanics*. 4th ed. Mechanical engineering. 1999: McGraw-Hill. 826.
48. Flemings, Merton C. *Solidification Processing*, McGraw-Hill, USA, 1974, 364 pages

Annexe I

Tableaux des essais réalisés en modélisation physique

Essais réalisés avec l'eau

Session	Index	Vitesse nominale du piston (m/s)	Vue	Ouverture des valves	FPS	Obturbateur	Fibres optiques	Prise
1	1	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	1
1	2	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	2
1	3	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	3
1	4	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	4
1	9	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	1
1	10	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	2
1	11	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	3
2	1	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
2	2	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
2	3	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
2	4	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
2	5	0.05	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
2	6	0.05	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
2	7	0.1	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
2	8	0.1	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
2	9	0.2	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
2	10	0.2	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
2	11	0.2	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	3
3	1	0.3	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
3	2	0.3	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
3	3	0.4	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
3	4	0.1	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	1
3	5	0.1	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	2
3	6	0.1	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	3
3	7	0.1	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	4
3	8	0.1	Moitié supérieure	6.5/13 + F	250	250	Fermées	1
3	9	0.1	Moitié supérieure	6.5/13 + F	250	250	Fermées	2
3	10	0.1	Moitié supérieure	1/13 + F	250	250	Fermées	1
3	11	0.1	Moitié supérieure	1/13 + F	250	250	Fermées	2
3	12	0.1	Moitié supérieure	D : 0/13 + F; 2G 13/13 + F	250	250	Fermées	1
3	13	0.1	Moitié supérieure	D : 0/13 + F; 2G 13/13 + F	250	250	Fermées	2
3	14	0.01	Moitié inférieure	D : 0/13 + F; 2G 13/13 + F	250	250	Fermées	1
3	15	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
3	16	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
3	17	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
3	18	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
3	19	0.05	Moitié inférieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
3	20	0.05	Moitié inférieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
3	21	0.1	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
3	22	0.1	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
3	23	0.2	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
3	24	0.2	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
3	25	0.3	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
4	9	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
4	10	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	11	0.3	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	1
6	15	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
6		0.3	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	
6	16	0.3	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
8	1	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Ouvert	1
8	2	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Ouvert	2
8	3	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Fermé	1
8	4	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Fermé	1
8	5	0.3	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Ouvert	1
8	6	0.3	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Ouvert	2
8	7	0.3	Moitié inférieure	13/13+O	250	1000	Ouvert	1

tableau 3 : Liste des essais réalisés avec l'eau

Essais réalisés avec la pâte de tomate

Session	Index	Vitesse nominale du piston (m/s)	Vue	Ouverture des valves	FPS	Obturbateur	Fibres optiques	Prise
1	5	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	1
1	6	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	2
1	7	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	3
1	8	0.1	Milieu	13/13 + O	125	125	Fermées	4
4	1	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
4	2	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
4	3	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
4	4	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
4	5	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	1
4	6	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	125	125	Fermées	2
4	7	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
4	8	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
5	1	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	1	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	2	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
5	3	0.02	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	4	0.3	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	5	0.3	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
5	6	0.4	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	7	0.4	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
5	8	0.2	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
5	9	0.2	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
5	10	0.1	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	1
6	1	0.1	Moitié supérieure	13/13 + F	250	250	Fermées	2
6	2	0.1	Moitié supérieure	6.5/13 + F	250	250	Fermées	1
6	3	0.1	Moitié supérieure	6.5/13 + F	250	250	Fermées	2
6	4	0.1	Moitié supérieure	1/13 + F	250	250	Fermées	1
6	5	0.1	Moitié supérieure	1/13 + F	250	250	Fermées	2
6	6	0.1	Moitié supérieure	D : 1/13 + F; 2G 13/13 + F	250	250	Fermées	1
6	7	0.1	Moitié supérieure	D : 1/13 + F; 2G 13/13 + F	250	250	Fermées	2
6	8	0.1	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
6	9	0.1	Moitié supérieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
6	10	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
6	11	0.05	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
6	12	0.05	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
6	13	0.05	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
6	14	0.02	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
7	1	0.1	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
7	2	0.1	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
7	3	0.2	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	3
7	4	0.2	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
7	5	0.2	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
7	6	0.3	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	3
7	7	0.3	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	1
7	8	0.3	Moitié inférieure	13/13 + O	250	250	Fermées	2
9	1	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	1000	Ouvert	1
9	2	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	500	Ouvert	1
9	3	0.05	Moitié supérieure	13/13+O	250	500	Ouvert	2
9	4	0.3	Moitié supérieure	13/13+O	250	500	Ouvert	1
10	1	0.05	Moitié supérieure	1/13+F	250	1000	Fermées	1
10	2	0.05	Moitié supérieure	1/13+F	250	500	Fermées	1
10	3	0.05	Moitié supérieure	2/13+F	250	500	Fermées	1
10	4	0.3	Moitié supérieure	2/13+F	250	500	Fermées	1
10	5	0.3	Moitié supérieure	2/13+F	250	500	Fermées	2
10	6	0.3	Moitié inférieure	2/13+F	250	500	Fermées	1

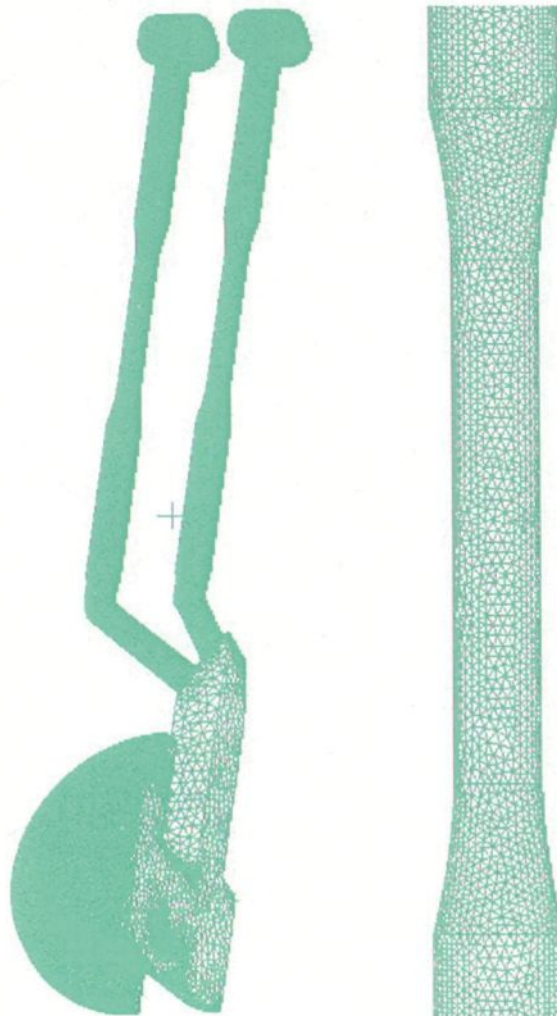
tableau 4 : Liste des essais réalisés avec la pâte de tomate

Annexe II

Description d'un cas type de simulation

Simulation tomate-référence

Maillage



Noeuds

Input Mesh Data:	
Number of Materials:	1
Total number of Nodes:	146629
Total number of Elements:	704228
Hex Elements:	0
Wedge Elements:	0
Tetrahedral Elements:	704228
X-dimension: -0.00003 to 76.10807 mm	
Y-dimension: -326.88000 to 141.13490 mm	
Z-dimension: -64.26403 to 40.03751 mm	
Model Size:	
Length = 76.10810 mm	
Height = 468.01491 mm	
Depth = 104.30154 mm	

Matériau

MF_TomateHeinz~1

Material Data (READ ONLY):

Material Name: MF_TomateHeinz-1 User: FortéM Date: 3/8/05

Composition Thermal Fluid Comments

Viscosity Surface Tension Permeability Filter

Newtonian Carreau-Yasuda Power-Cutoff

Zero Viscosity K Factor Power

Constant

Enter: Pa.s

Table

Erase Table Erase Line Import Export

Temperature Zero Visc. Pa.s

Material Data (READ ONLY):

Material Name: MF_TomateHeinz-1 User: FortéM Date: 3/8/05

Composition Thermal Fluid Comments

Viscosity Surface Tension Permeability Filter

Newtonian Carreau-Yasuda Power-Cutoff

Zero Viscosity K Factor Power

Constant

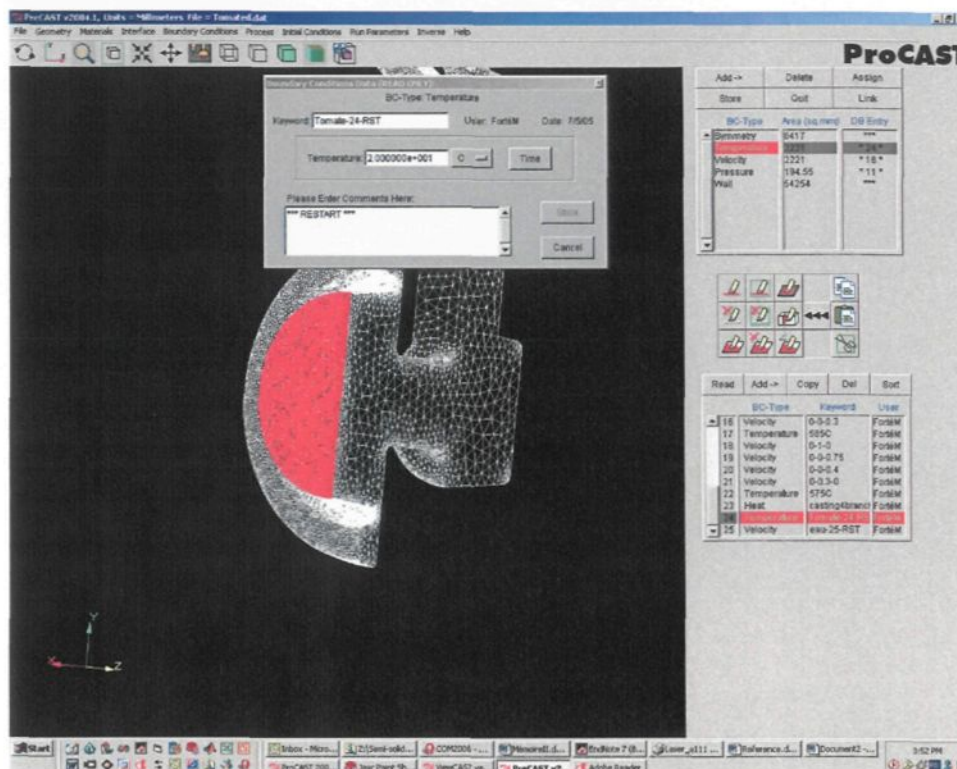
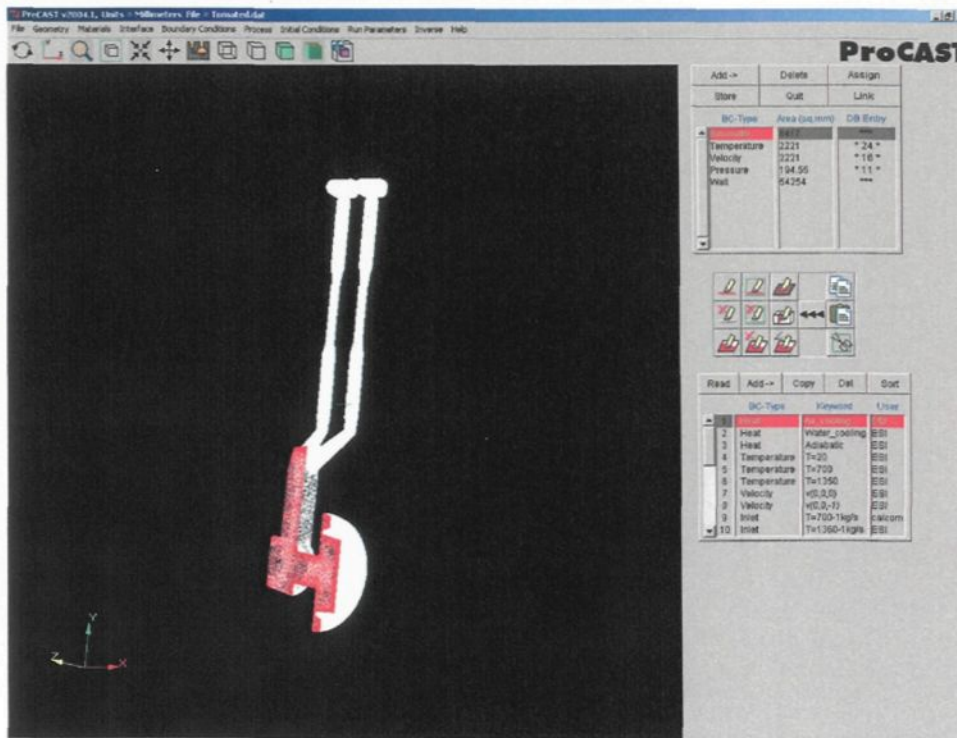
Enter: Pa.s

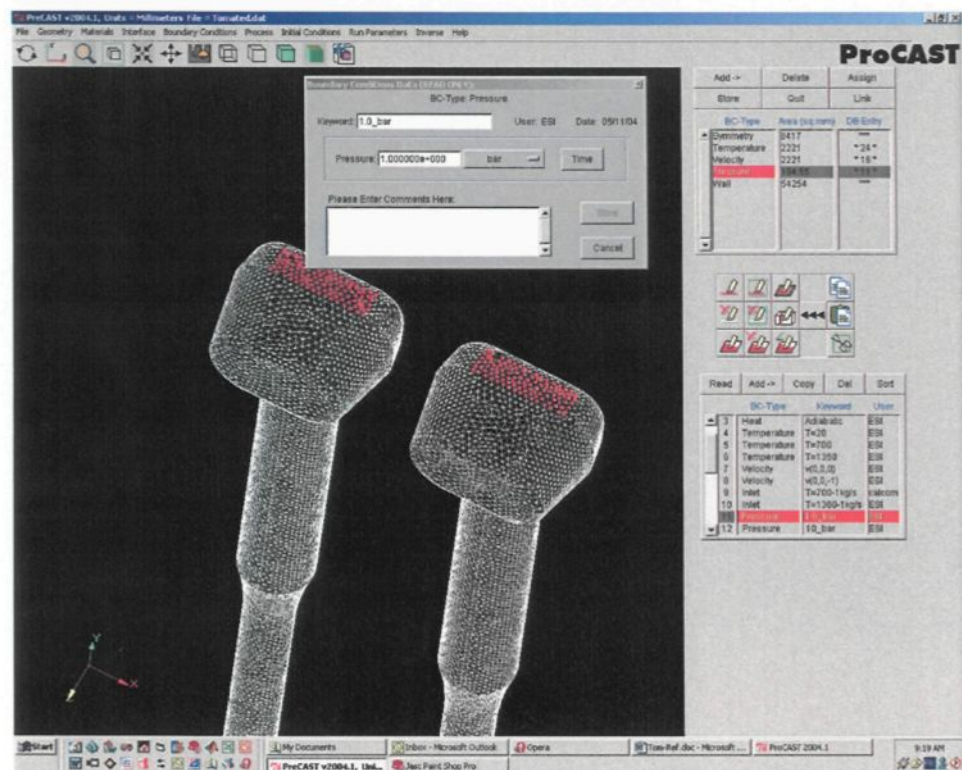
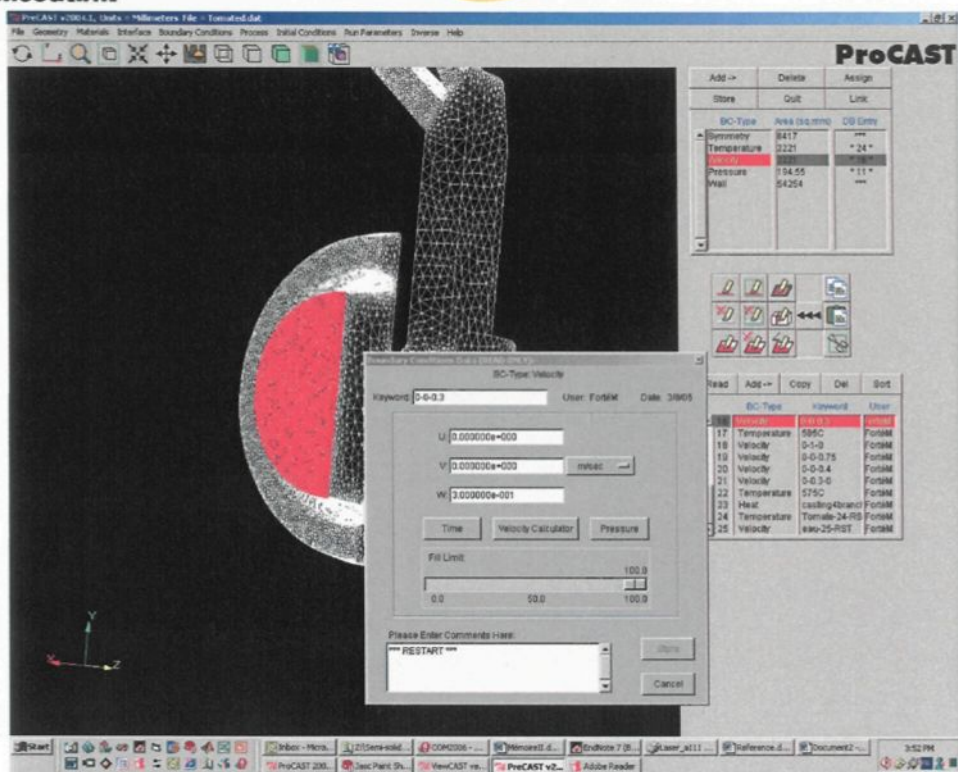
Table

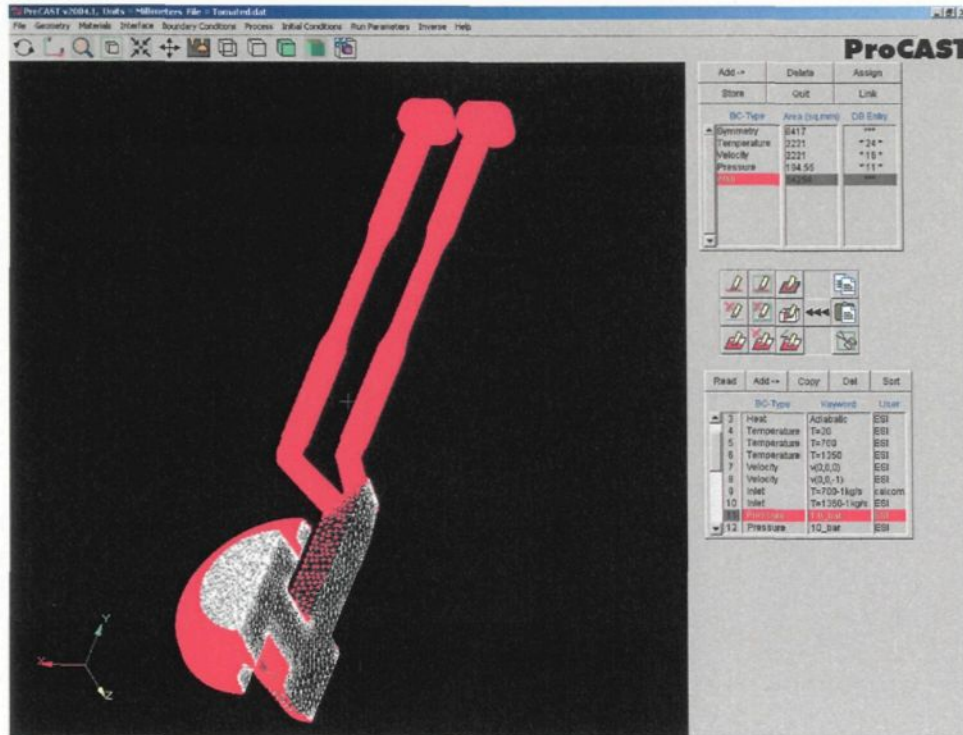
Erase Table Erase Line Import Export

Temperature Power

Conditions limites







Parametres

```

COM
TUNITS 2
VUNITS 1
PUNITS 2
QUNITS 1
INILEV 0
NSTEP 200000
NCYCLE 0
NRSTAR 5
TFREQ 1
VFREQ 20
QFREQ 10000
SFREQ 10
RFREQ 1
EFREQ 1
FFREQ 1
PFREQ 1000000
SCALC 10
THERMAL 0
MICRO 0
FLOW 3
STRESS 0
EM 0
TURB 0
HIVISC 0

COMPRES 0
COUPLED 0
AVEPROP 0
GAS 0
FREESF 1
NNEWTON 2
WALLF 0.000000e+000
TPROF 0
VPROF 0
HEAD_ON 0
WSHEAR 0
PINLET 0
PENETRATE 0
SDEBUG 1
PRNLEV 0
NPRFR 1
RDEBUG 0
CGSQ 0
DIAG 16384
LUFAC 1
NEWTONR 0
LINSRC 0
USER 0
POROS 1
ENCLID 0

EMITER 100
BEM 0
ISEED 0
DT 1 1.000000e-002
DTMAX 1 1.000000e-002
DTMAXFILL 1 1.000000e-001
TFINAL 1 3.000000e+000
TENDFILL 2
0.000000e+000
TSTOP 2 0.000000e+000
TCYCLE 1 0.000000e+000
TFILL 1 1.000000e+000
TOPEN 1 0.000000e+000
TCLOSE 1 0.000000e+000
TEJECT 1 0.000000e+000
TBSPRAY 1 0.000000e+000
TESPRAY 1 0.000000e+000
TMODS 2.000000e+000

```


TMODR 5.00000e-001	CTWO 1.92000e+000	CLUMP 1.00000e+000
CONVT 1 1.00000e+000	KAPPA 4.00000e-001	GAPMOD 0
CONVV 5.00000e-002	VFTIME 1	TRI2QUAD 1
CONVS 1.00000e-002	0.00000e+000	GATEFEED 0
CONVTOL 1.00000e-004	VFDISP 2	GATENODE 0
COURANT 7.50000e-001	0.00000e+000	USERHO 1
LVSURF 9.99000e-001	VFLIM 0.00000e+000	CRITFS 5.00000e-001
MACROFS 7.00000e-001	EPTOL 8.00000e-001	AVEPEN 3 1.00000e-
PIPEFS 3.00000e-001	ANGTOL 4.50000e+001	001
MOBILE 3.00000e-001	PENALTY 1.00000e+000	FEEDLEN 3
PLIMIT 5	CFREQ 0.00000e+000	5.00000e+000
1.00000e+020	CELLSZ 1 1.00000e-	MFREQ 10
PREF 7 0.00000e+000	003	FOAMHTC 0.02
FLOWDEL 1	TRELAX 1.00000e+000	FOAMHTCMAX 0.25
1.00000e+020	CRELAX 1.00000e+000	BURNZONE 1.0
TSOFF 1 0.00000e+000	PRELAX 1.00000e+000	GASFRAC 0.1
CINIT 3.00000e-001	TBRELAX 1.00000e+000	DETACHTOP 0
CMU 9.00000e-002	MRELAX 1.00000e+000	TILT 0
SIGMAK 1.00000e+000	ADVECTW 0.00000e+000	LOADSCL 1
SIGMAE 1.30000e+000	BETA 5.00000e-001	
CONE 1.44000e+000	MLUMP 1.00000e+000	