

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
Patrice PEYRE et Éric CHARKALUK	
<b>Chapitre 1. Les procédés de fabrication additive métallique</b> . . . . .	5
Coordonné par Patrice PEYRE	
1.1. Le procédé DED-LMD . . . . .	8
1.1.1. Bref historique du procédé . . . . .	8
1.1.2. Éléments de base du procédé . . . . .	8
1.1.3. Présentation et influence des paramètres du procédé . . . . .	12
1.1.4. Cycles thermiques induits par le procédé . . . . .	18
1.1.5. Types de matériaux concernés . . . . .	20
1.1.6. Microstructures des pièces fabriquées ou réparées . . . . .	20
1.1.7. Systèmes industriels . . . . .	21
1.2. Le procédé L-PBF . . . . .	26
1.2.1. Distinction entre frittage et fusion laser . . . . .	26
1.2.2. Intérêts et souhaits des industriels . . . . .	27
1.2.3. Principe et éléments de base du procédé . . . . .	29
1.2.4. Types de matériaux concernés . . . . .	33
1.2.5. Présentation et influence des paramètres opératoires du procédé . . . . .	33
1.2.6. Comparaison du procédé L-PBF avec le procédé DED. . . . .	37
1.2.7. Conception et stratégie de fabrication d'une pièce . . . . .	38
1.2.8. Domaine des bains stables adaptés à la construction . . . . .	42
1.2.9. Optimisation de la fabrication L-PBF de pièces 3D. . . . .	43

1.3. Le procédé de fusion sur lit de poudres par un faisceau d'électrons E-PBF ( <i>Electron Powder Bed Fusion</i> ) . . . . .	44
1.3.1. Introduction . . . . .	44
1.3.2. Mise en œuvre du procédé E-PBF . . . . .	45
1.3.3. Optimisation des conditions de fusion et défauts caractéristiques . . . . .	53
1.3.4. Autres caractéristiques du procédé E-PBF . . . . .	58
1.3.5. Conclusion partielle sur l'E-PBF . . . . .	63
1.4. Le procédé de dépôt de matière par fusion de fil à l'arc électrique (WAAM) . . . . .	64
1.4.1. Technologies de fabrication additive par procédé arc/fil . . . . .	64
1.4.2. Paramètres procédés en dépôt WAAM . . . . .	68
1.4.3. Mise en œuvre des matériaux . . . . .	70
1.4.4. Contraintes résiduelles et distorsions . . . . .	73
1.4.5. Parachèvement ou finition . . . . .	74
1.4.6. Chaîne numérique : contrôle en ligne . . . . .	75
1.4.7. Conclusion . . . . .	78
1.5. Les procédés émergents . . . . .	78
1.5.1. Fabrication indirecte par frittage laser sélectif et infiltration . . . . .	78
1.5.2. Fabrication indirecte par MBJ ( <i>Metal Binder Jetting</i> ) . . . . .	84
1.5.3. Fabrication directe à l'état solide, sans fusion . . . . .	87
1.6. Conclusion . . . . .	93
1.7. Bibliographie . . . . .	95

## **Chapitre 2. La matière première : les poudres et les fils métalliques . . . . . 103**

Coordonné par Marc THOMAS

2.1. Les poudres métalliques . . . . .	103
2.1.1. Introduction . . . . .	103
2.1.2. Élaboration des poudres . . . . .	105
2.1.3. Propriétés physico-chimiques des poudres . . . . .	121
2.1.4. Propriétés rhéologiques des poudres . . . . .	123
2.1.5. Influence des poudres sur les procédés et les propriétés finales . . . . .	131
2.1.6. Normalisation . . . . .	135
2.1.7. En résumé . . . . .	136
2.2. Les fils métalliques . . . . .	136
2.2.1. Introduction . . . . .	136
2.2.2. Élaboration des fils . . . . .	139
2.2.3. Utilisation de fils d'apport en fabrication additive . . . . .	142

2.2.4. Influence des fils sur les procédés et les propriétés finales . . . . .	144
2.2.5. En résumé . . . . .	155
2.3. Bibliographie . . . . .	155

### **Chapitre 3. La physique des procédés de fabrication additive métallique** . . . . .

159

Coordonné par Patrice PEYRE

3.1. L'interaction énergie-poudre-zone fondue dans les procédés additifs par fusion laser . . . . .	159
3.1.1. Introduction . . . . .	159
3.1.2. Rappel des grandeurs physiques essentielles . . . . .	160
3.1.3. Absorption du rayonnement et transfert de chaleur : différents régimes d'interaction pour différents procédés . . . . .	161
3.1.4. Cycles thermiques locaux : influence des conditions aux limites . . . . .	170
3.1.5. Hydrodynamique des zones fondues et défauts associés . . . . .	172
3.1.6. Conclusion partielle sur la physique des procédés de fabrication additive laser . . . . .	178
3.2. La physique du procédé E-PBF . . . . .	179
3.2.1. Introduction . . . . .	179
3.2.2. Rappel des grandeurs physiques essentielles caractéristiques de l'interaction électron-matière . . . . .	179
3.2.3. Les phénomènes induits lors de l'interaction électron-matière . . . . .	181
3.2.4. Absorption d'énergie dans la poudre en E-PBF . . . . .	185
3.2.5. Description de la zone fondue en E-PBF et défauts associés . . . . .	188
3.2.6. Conclusion partielle sur l'E-PBF . . . . .	190
3.3. Physique du procédé WAAM . . . . .	191
3.3.1. Rappel des grandeurs physiques essentielles . . . . .	191
3.3.2. Interaction arc-fil-dépôt . . . . .	193
3.3.3. Forme des dépôts et défauts associés . . . . .	200
3.4. Conclusion . . . . .	203
3.5. Bibliographie . . . . .	203

### **Chapitre 4. La simulation numérique des procédés de fabrication additive** . . . . .

209

Coordonné par Muriel CARIN

4.1. Simulation thermo-hydrodynamique . . . . .	209
4.1.1. Description des phénomènes physiques . . . . .	209
4.1.2. Modélisation de l'apport de chaleur . . . . .	211

4.1.3. Modélisation de l'apport de matière . . . . .	215
4.1.4. Méthodes numériques pour simuler la construction du dépôt . . .	216
4.1.5. Modélisation du transfert de chaleur et de masse dans le bain. . .	218
4.1.6. Exemples de simulations thermo-hydrodynamiques . . . . .	221
4.2. Simulation thermomécanique . . . . .	231
4.2.1. Simulation à l'échelle de la pièce : différentes techniques . . . . .	233
4.2.2. Résolution thermique. . . . .	234
4.2.3. Résolution métallurgique . . . . .	236
4.2.4. Résolution mécanique . . . . .	241
4.2.5. Couplage . . . . .	243
4.2.6. Application à l'échelle mésoscopique : contraintes locales de fabrication . . . . .	245
4.2.7. Application à l'échelle macroscopique . . . . .	245
4.2.8. Logiciels et codes de calcul dédiés à la fabrication additive . . . .	249
4.3. Conclusion . . . . .	249
4.4. Bibliographie. . . . .	250
<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>255</b>
Patrice PEYRE et Éric CHARKALUK	
<b>Liste des abréviations</b> . . . . .	<b>257</b>
<b>Liste des auteurs</b> . . . . .	<b>269</b>
<b>Index</b> . . . . .	<b>273</b>
<b>Sommaire de <i>La fabrication additive des alliages métalliques 2</i></b> . . .	<b>275</b>