

Table des matières

Introduction	1
Arnaud PERROT	
Chapitre 1. Généralités et technologies	9
Arnaud PERROT et Sofiane AMZIANE	
1.1. Introduction	9
1.2. Généralités sur l'impression 3D et la fabrication additive	10
1.2.1. Qu'est-ce que l'impression 3D ?	10
1.2.1.1. Les principaux concepts	11
1.2.1.2. Classifications des technologies d'impression.	12
1.2.2. Vers l'impression 3D des matériaux à base cimentaire	14
1.3. La fabrication digitale et additive des matériaux cimentaires.	15
1.3.1. Introduction	15
1.3.2. Méthodes d'impression par extrusion/dépôt	16
1.3.2.1. Assurer le malaxage, le transport et le dépôt.	16
1.3.2.2. Présentation de la méthode extrusion/dépôt	19
1.3.2.3. Différents robots pour différentes échelles de réalisation.	20
1.3.2.4. Difficultés et limitations	28
1.3.3. Méthodes d'impression par injection dans un lit de particules	29
1.3.3.1. Présentation de la méthode.	29
1.3.3.2. Les différentes échelles de réalisation.	30
1.3.3.3. Difficultés et limitations	32

1.3.4. Méthodes d'impression alternatives	32
1.3.4.1. Coffrage glissant piloté : <i>Smart Dynamic Casting</i>	32
1.3.4.2. Injection imprimée <i>Mesh Mould</i> dans un grillage coffrage	34
1.3.4.3. Projection de béton sur un support mobile	35
1.4. Un classement pour les méthodes d'impression 3D béton	36
1.4.1. Philosophie	36
1.4.2. Les paramètres du classement	36
1.4.2.1. Échelle de l'objet imprimé	36
1.4.2.2. Échelle de la section du matériau imprimé	37
1.4.2.3. Environnement de l'impression	37
1.4.2.4. Conditions d'assemblage des éléments	38
1.4.2.5. Utilisation de supports	38
1.4.2.6. Complexité du robot	39
1.4.3. Exemple de classement	39
1.5. Bibliographie	41

Chapitre 2. Techniques par extrusion/dépôt 47

Arnaud PERROT et Damien RANGEARD

2.1. Introduction	47
2.2. Décomposition du procédé en étapes	49
2.3. Comportement à l'état frais et étape d'impression	51
2.3.1. Rhéologie des matériaux à base cimentaire	51
2.3.1.1. Critère de mise en écoulement du matériau à l'état frais	51
2.3.1.2. Critère plastique non atteint : un comportement élastique solide	53
2.3.1.3. Critère plastique atteint : un comportement fluide visqueux	54
2.3.1.4. Évolution temporelle de la rhéologie, activité physico-chimique	55
2.3.2. Pompage	58
2.3.3. Extrusion	59
2.3.4. Stabilité d'une couche élémentaire lors du dépôt	62
2.3.5. Stabilité globale de la structure imprimée à l'état frais	63
2.3.5.1. Mécanismes de rupture de structures imprimées	63
2.3.5.2. Rupture par écrasement de la première couche	64

2.3.5.3. Rupture par flambement	65
2.4. Autres problèmes associés à l'impression béton par extrusion . . .	67
2.4.1. Déformation élastique et précision de dépôt	67
2.4.2. Séchage, retrait et fissuration.	69
2.4.2.1. Fissuration par rupture en traction	69
2.4.2.2. retrait et séchage.	70
2.4.3. Collage entre couches, faiblesse à l'interface entre couches .	70
2.4.4. Notion de fenêtre de temps	71
2.5. Conclusion	73
2.6. Bibliographie	73

Chapitre 3. Impression 3D par liaison sélective dans un lit de particules : principes et challenges 79

Alexandre PIERRE et Arnaud PERROT

3.1. Introduction	79
3.2. Classification des procédés et stratégies d'impression sélective	81
3.2.1. Activation de ciment	83
3.2.1.1. Principe	83
3.2.1.2. Applications	83
3.2.2. Intrusion sélective.	85
3.2.2.1. Principe	85
3.2.2.2. Applications	86
3.2.3. Injection de liant	87
3.3. État de l'art de l'impression sélective et réalisations majeures . . .	87
3.4. Challenges scientifiques	89
3.4.1. Activation de ciment et effet de la pénétration de l'eau . .	89
3.4.1.1. Problématique	89
3.4.1.2. Théorie	91
3.4.1.3. Exemple de l'effet de l'assemblage granulaire utilisé .	92
3.4.2. Intrusion sélective et pénétration de la pâte cimentaire . .	94
3.4.2.1. Problématique	94
3.4.2.2. Théorie	96
3.4.2.3. Exemple de l'effet de l'assemblage granulaire utilisé .	98
3.4.3. Vers une modélisation en trois dimensions	99
3.5. Conclusion	101
3.6. Bibliographie	101

Chapitre 4. Comportement mécanique des matériaux cimentaires imprimés 105

Mohammed SONEBI, Sofiane AMZIANE et Arnaud PERROT

4.1. Introduction	105
4.2. Performances mécaniques des matériaux cimentaires imprimés par la méthode de l'extrusion/dépôt	106
4.2.1. Effet de l'extrusion sur les caractéristiques mécaniques des composites cimentaires	106
4.2.2. Comportement anisotrope des matériaux cimentaires imprimés	108
4.2.2.1. Cas des matériaux non fibrés	109
4.2.2.2. Cas des matériaux fibrés	114
4.3. Effet de la fabrication additive sur le comportement mécanique des matériaux cimentaires	120
4.3.1. Béton imprimé, matériau stratifié anisotrope : les possibles causes	120
4.3.2. Effet des paramètres du procédé d'impression sur les caractéristiques mécaniques	121
4.3.2.1. Effet de l'intervalle de temps entre dépôts successifs	121
4.3.2.2. Effet de l'état hydrique, effet délétère du séchage	122
4.4. Comportement mécanique obtenu avec les autres méthodes d'impression 3D de matériaux cimentaires	123
4.4.1. Fabrication à l'aide du coffrage glissant robotisé <i>Smart Dynamic Casting</i>	123
4.4.2. Impression utilisant la méthode de l'injection dans un lit de particules	123
4.5. Conclusion	124
4.6. Bibliographie	125

Chapitre 5. Impact et conception des structures 129

Arnaud PERROT et Damien RANGEARD

5.1. Introduction	129
5.2. Liberté de formes : libération architecturale et optimisation topologique	130
5.2.1. L'impression 3D béton : une aubaine pour les architectes ?	130

5.2.2. Vers des structures aux formes optimisées ?	131
5.2.3. Vers un passage du noir et blanc à la couleur pour les imprimantes 3D béton ?	133
5.3. Conception des structures : stratégies de renforcement et codes de dimensionnement	134
5.3.1. L'utilisation de fibres	135
5.3.2. Les renforts externes	136
5.3.3. Câble entraîné au sein du matériau extrudé.	137
5.3.4. Les réservations	137
5.3.5. Envelopper des armatures préalablement mises en place .	139
5.3.6. Vers un code de dimensionnement spécifique ?	139
5.4. Impacts de l'impression 3D	139
5.4.1. Impact environnemental.	139
5.4.2. Impact sociétal.	141
5.4.3. Impact économique.	142
5.5. Conclusion	143
5.6. Bibliographie	143

Liste des auteurs	147
------------------------------------	------------

Index	149
------------------------	------------