

Table des matières

| | |
|--|----|
| Avant-propos | 1 |
| Arnaud PERROT | |
| | |
| Chapitre 1. Impression 3D béton : technologies, applications et classifications | 5 |
| Arnaud PERROT, Yohan JACQUET et Sofiane AMZIANE | |
| 1.1. Introduction : les différentes facettes de l'impression | 5 |
| 1.2. L'impression 3D : du modèle numérique à l'objet physique | 6 |
| 1.2.1. Du modèle numérique à l'impression | 6 |
| 1.2.2. Les procédés d'impression | 8 |
| 1.2.3. Les procédés d'impression dédiés aux matériaux cimentaires. | 9 |
| 1.3. L'impression 3D béton : exemples d'applications | 10 |
| 1.3.1. Préfabrication | 10 |
| 1.3.2. Impression sur site | 13 |
| 1.3.3. Vers une démocratisation de l'impression 3D béton ? | 15 |
| 1.4. Classifications des procédés d'impression béton | 16 |
| 1.4.1. Classification proposée par Duballet et ses co-auteurs | 16 |
| 1.4.2. Classification proposée par la RILEM. | 21 |
| 1.4.3. Classification complémentaire | 24 |
| 1.5. Imprimer du béton avec des liants alternatifs ou sans ciment ? | 25 |
| 1.6. Conclusion | 27 |
| 1.7. Bibliographie. | 27 |

Chapitre 2. Impression 3D béton par extrusion-dépôt de filaments 37

Arnaud PERROT et Yohan JACQUET

| | |
|--|----|
| 2.1. Introduction. | 37 |
| 2.2. Les grandes familles d'impression | 39 |
| 2.2.1. Une question d'échelle. | 39 |
| 2.2.2. Les matériaux mono- et bicomposants | 40 |
| 2.2.3. La complexité robotique. | 41 |
| 2.3. Les matériaux imprimables | 42 |
| 2.3.1. Comportement du matériau pendant l'impression. | 42 |
| 2.3.2. Comportement du matériau en écoulement. | 44 |
| 2.3.3. Comportement du matériau au repos | 45 |
| 2.3.4. Spécifications pour l'impression | 49 |
| 2.4. Les grandes étapes de l'impression 3D par extrusion | 50 |
| 2.4.1. Malaxage | 50 |
| 2.4.2. Pompage | 51 |
| 2.4.3. Extrusion | 52 |
| 2.4.4. Dépôt et stabilité locale d'un filament. | 54 |
| 2.4.5. Stabilité globale de la structure en cours d'impression | 58 |
| 2.4.6. Déformation élastique et précision de l'impression | 61 |
| 2.4.7. Cure du matériau durant et après l'impression | 62 |
| 2.5. Conclusion | 64 |
| 2.6. Bibliographie. | 65 |

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux imprimés frais et durcis du laboratoire à la pratique 73

Nicolas DUCOULOMBIER, Victor DE BONO, Fatima Zahraa KACHKOUCH,

Yohan JACQUET et Arnaud PERROT

| | |
|--|-----|
| 3.1. Introduction. | 73 |
| 3.2. Caractérisation des matériaux à l'état frais | 74 |
| 3.2.1. Formulation en laboratoire : cahier des charges | 74 |
| 3.2.2. Contrôle de l'impression dans un contexte industriel. | 84 |
| 3.3. Caractérisation des matériaux à l'état durci | 91 |
| 3.3.1. Cahier des charges à remplir | 91 |
| 3.3.2. Caractérisation des propriétés physiques | 92 |
| 3.3.3. Caractérisation mécanique des matériaux imprimés | 92 |
| 3.4. Durabilité | 98 |
| 3.5. Conclusion | 100 |
| 3.6. Bibliographie. | 100 |

| | |
|--|------------|
| Chapitre 4. Méthodes d'impression alternatives pour matériaux cimentaires | 109 |
| Alexandre PIERRE et Arnaud PERROT | |
| 4.1. Introduction. | 109 |
| 4.2. Méthodes avec support | 111 |
| 4.2.1. Supports imprimés <i>in situ</i> (coffrage perdu). | 111 |
| 4.2.2. Support mobile | 115 |
| 4.2.3. Support sacrificiel. | 117 |
| 4.3. Méthodes à lits de particules. | 123 |
| 4.4. Méthodes sans support | 125 |
| 4.5. Choix du procédé | 126 |
| 4.6. Perspectives et opportunités | 128 |
| 4.6.1. Supports temporaires dissolvables | 128 |
| 4.6.2. Liaison sélective de granulats avec des mousses. | 129 |
| 4.6.3. Renforts structuraux | 129 |
| 4.6.4. Matériaux à gradients de propriétés | 130 |
| 4.7. Conclusion | 131 |
| 4.8. Bibliographie. | 131 |
| | |
| Chapitre 5. Applications structurelles de l'impression 3D | 137 |
| Romain MESNIL, Romain DUBALLET et Olivier BAVEREL | |
| 5.1. Introduction. | 137 |
| 5.1.1. Conception des structures | 137 |
| 5.1.2. Principes de dimensionnement des structures | 139 |
| 5.1.3. Organisation du chapitre. | 141 |
| 5.2. Évaluation des propriétés du matériau durci | 142 |
| 5.2.1. Matériau ou microstructure ? | 142 |
| 5.2.2. Vers une conciliation des points de vue | 143 |
| 5.2.3. Matériau orthotrope ou isotrope ? | 145 |
| 5.2.4. Essais mécaniques | 147 |
| 5.2.5. Conclusion | 148 |
| 5.3. Maçonnerie | 148 |
| 5.3.1. Maçonnerie armée | 148 |
| 5.3.2. Maçonnerie chaînée | 149 |
| 5.3.3. Coques et voûtes | 151 |
| 5.3.4. Lien entre procédé et fonctionnement structurel. | 153 |
| 5.3.5. Vers une approche stéréotomique de l'impression | 154 |
| 5.4. Impression 3D et béton armé | 156 |
| 5.4.1. Coffrage perdu ou collaborant ? | 156 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.2. Béton imprimé armé | 158 |
| 5.4.3. Fibrage du béton imprimé | 161 |
| 5.5. Précontrainte | 162 |
| 5.5.1. Principe | 162 |
| 5.5.2. Application. | 162 |
| 5.5.3. Défis. | 163 |
| 5.6. Conclusion | 163 |
| 5.6.1. Optimisation structurelle et fabrication additive | 165 |
| 5.6.2. Le langage structurel de l'impression 3D | 165 |
| 5.7. Bibliographie. | 166 |

Chapitre 6. Renforcement des structures imprimées 171

Jean-François CARON, Nicolas DUCOULOMBIER et Léo DEMONT

| | |
|---|-----|
| 6.1. Quelques rappels sur le renforcement des matériaux cimentaires | 171 |
| 6.1.1. Renforcement structurel des matériaux cimentaires. | 172 |
| 6.1.2. Fibrage des matériaux cimentaires | 173 |
| 6.2. Modes de renforcement pour les matériaux et structures cimentaires mis en œuvre par fabrication additive. | 178 |
| 6.2.1. Renforcements <i>a posteriori</i> | 179 |
| 6.2.2. Renforcement du matériau mortier. | 181 |
| 6.2.3. Renforcements en ligne | 182 |
| 6.3. Détails sur un renforcement en ligne particulier, le concept <i>Flow-Based-Pultrusion</i> | 187 |
| 6.3.1. Technologie | 187 |
| 6.3.2. Prototypes et dispositifs | 187 |
| 6.3.3. Caractéristique du matériau renforcé durci | 189 |
| 6.4. Conclusion | 190 |
| 6.5. Bibliographie. | 192 |

Chapitre 7. Les outils de simulation numérique au service de l'impression 3D. 201

Duc-Phi DO, Zeinab DIAB, Sébastien RÉMOND et Dashnor HOXHA

| | |
|--|-----|
| 7.1. Introduction. | 201 |
| 7.2. Conception du modèle géométrique d'un objet virtuel | 202 |
| 7.3. Modélisation numérique du procédé d'impression 3D | 204 |
| 7.3.1. Simulation de la constructibilité à l'échelle de la structure. | 205 |
| 7.3.2. Simulation du procédé de dépôt de matériau à l'échelle de la couche imprimée | 211 |

| | |
|--|-----|
| 7.4. Discussions sur les progrès récents, les limites et l'orientation future de la recherche. | 215 |
| 7.5. Conclusion | 226 |
| 7.6. Bibliographie. | 227 |

Chapitre 8. Impact environnemental de l'impression 3D béton . . . 233

Kateryna KUZMENKO, Charlotte ROUX et Adélaïde FERAILLE

| | |
|--|-----|
| 8.1. Introduction. | 233 |
| 8.2. Technologie de l'impression 3D et cas d'étude. | 234 |
| 8.2.1. Impression 3D par extrusion-dépôt | 234 |
| 8.2.2. Des éléments constructifs économes en matériaux | 236 |
| 8.2.3. Cas d'étude. | 237 |
| 8.2.4. Problématique de l'étude | 239 |
| 8.3. Méthodologie et cas d'étude | 240 |
| 8.3.1. Méthode d'analyse du cycle de vie. | 240 |
| 8.3.2. Modèle d'impact, frontières du système et UF pour le procédé de l'impression 3D béton | 241 |
| 8.3.3. Modèle d'impact et UF pour le système constructif « procédé de l'impression 3D béton ». | 243 |
| 8.4. Résultats. | 244 |
| 8.4.1. Impact environnemental à l'échelle du matériau imprimé | 244 |
| 8.4.2. Impact environnemental à l'échelle du système constructif | 246 |
| 8.5. Discussions et perspectives | 250 |
| 8.5.1. Considérer d'autres matériaux pour l'impression | 250 |
| 8.5.2. Considérer le transfert d'impact | 250 |
| 8.5.3. Améliorer la qualité et la quantité de données d'inventaires disponibles | 251 |
| 8.6. Conclusion | 252 |
| 8.7. Remerciements. | 253 |
| 8.8. Bibliographie. | 253 |

Liste des auteurs. 257

Index 259