

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA FABRICATION ADDITIVE



Table des matières

Introduction	4
Les matériaux	4
1) Les plastiques	4
2) Les métaux	5
3) Autres matériaux	6
Les techniques de fabrication additive	8
1) Photopolymérisation	8
2) Liage de poudre	9
3) Dépôt progressif de matière : Fused Deposition Modeling (FDM)	10
4) Les techniques expérimentales	10
Applications	12
1) Optimisation topologique	12
2) Lattices	12
3) Conception paramétrique	13
4) La construction additive	13
a. L'impression directe, Direct Digital Fabrication with Concrete (DDFC)	13
b) L'impression indirecte, Digital Fabrication of Framework (DFF)	14
5) Impression 4D	15
Potentiels et limites	15
1) Les avantages de la fabrication additive :	15
2) Les limites de la fabrication additive	16
Conclusion	16
Références bibliographiques	17

Introduction

La fabrication additive peut être définie comme “ un procédé de fabrication assisté par ordinateur qui fait appel à l’utilisation de machines à commandes numériques pour imprimer des objets en 3D. Elle consiste à mettre en forme un objet par ajout de couches successives de matière.” [Beddiar et al., 2019]. Trois étapes forment la fabrication additive [Labonnote et al., 2016]:

- la création d’un modèle digital par modélisation ou scan d’un objet existant
- la découpe du modèle numérique en strates par un algorithme
- la fabrication de l’objet en strates successives de matière

L’impression 3D permet de produire des formes complexes et s’inscrit dans un flux continu de conception et de fabrication [OVERALL et al., 2020]. Souvent associée à une troisième révolution industrielle [Berchon & Luyt, 2013], elle permet de « matérialiser le monde numérique » [Brayer, 2017] au sein d’une « chaîne numérique complète », d’un « écosystème digital » [Brument & Campagnoli, 2016]. Tout au long du parcours de production et de conception, la fabrication additive permet un dialogue avec l’usager et ajoute une dimension collaborative à la production [Brument & Campagnoli, 2016]. Un véritable changement des modes de penser et de produire s’impose, il faut “designer une impression 3D et non plus imprimer un design” [Huang, 2016].

Les premières expérimentations sur l’impression d’un volume se développent dans la seconde moitié du XXème siècle. La première imprimante 3D est développée par l’ingénieur Chuck Hull et commercialisée en 1988 par 3D Systems [Beddiar et al., 2019]. Elle s’appuie sur la technique de la stéréolithographie [brevet déposé en 1984]. En 1988, Scott et Lisa Crump développent pour l’entreprise Stratasys le procédé Fused Deposition Modelling (FDM) utilisant un matériau liquéfié. Ce procédé est celui utilisé aujourd’hui dans les imprimantes 3D personnelles [Berchon & Luyt, 2013]. Ce n’est cependant qu’en 1996 qu’apparaît pour la première fois le terme de « imprimante 3D ».

Les matériaux

Les matériaux pouvant être imprimés doivent réunir quatre caractéristiques [Labonnote et al., 2016 ; Lim et al., 2012] :

- pompabilité
- imprimabilité ou extrudabilité
- constructibilité, dépend de la résistance des matériaux encore non solide à la déformation face aux charges. Il est équivalent au nombre de strates pouvant être ajoutées sans déformation [Le et al., 2012].
- « open time » : durée pendant laquelle ces trois premières caractéristiques demeurent constantes.

Il est donc nécessaire d’avoir une analyse fine de la rhéologie du matériau, c’est-à-dire de sa déformation et de son écoulement, notamment pour les procédés d’impression par extrusion car la fenêtre permettant la pompabilité du matériau est étroite [Kruger et al., 2019].

1) Les plastiques

- Résine : mat ou brillant, blanc ou noir [Berchon & Luyt, 2013]. Ce matériau se solidifie rapidement et donne des objets rigides [Voney et al., 2021]. Cependant les produits en résine ne sont pas résistants au feu et relâchent des COV pendant leur cycle de vie [Voney et al., 2021].
- Polyamide

- ABS [Acrylonitrile Butadiène Styrene]. Ce plastique est le plus couramment utilisé par toutes les imprimantes personnelles sous la forme de filaments [Berchon & Luyt, 2013]. La composition de l'ABS peut être modifiée par l'ajout de fibre, par exemple de bois [Bedarf et al., 2021], de verre [Choo et al., 2019] ou de carbone [SNOOKS et al., 2020].

- PLA : ce plastique biodégradable [fabriqué à partir d'amidon de maïs] refroidit et durcit plus rapidement que l'ABS. Il est disponible en plusieurs couleurs et peut également être transparent [Berchon & Luyt, 2013]. Cependant les PLA blancs sont moins sujets à la déformation et à la décoloration que les PLA colorés [Grassi et al., 2019]. Comme pour l'ABS, il est possible d'ajouter des composants pour modifier les caractéristiques du matériau, par exemple des fibres de bois ou du sable [Grassi et al., 2019]. Par ailleurs, à long terme les PLA se révèlent sensibles aux UV qui en dégradent la structure et les décolorent [Grassi et al., 2019]. Cependant, parmi les plastiques utilisés en fabrication additive, les PLA montrent la plus grande résistance à la traction et le meilleur module d'élasticité [Naboni et al., 2020]

- PVA [Alcool Polyvinylique]. Ce plastique est principalement utilisé pour l'impression de supports de par sa solubilité à l'eau [Sadasivuni et al., 2020]. Il est également employé pour la fabrication de coffrages car il peut être recyclé et réutilisé en le cristallisant [Doyle, 2019; Jipa & Dillenburger, 2022; Leschok & Dillenburger, 2020].

- les nylons : Long-Chain Nylon [LCN] ou Carbon Nylon [NC]

- PEEK [Polyétheréthercétone] : un thermoplastique semi-cristallin doté de bonnes résistances mécaniques [jusqu'à 77MPa en traction] [Wu et al., 2015; Xiaoyong et al., 2017]. Résistant à la chaleur et l'usure, il est notamment utilisé pour les industries de l'automobile et de l'aéronautique et en médecine [Panayotov et al., 2016; Roskies et al., 2016].

-TPE [élastomère thermoplastique] : un mélange de thermoplastiques et de caoutchouc. Recyclable et réutilisable, ce matériau possède également d'excellentes propriétés élastiques [MCGEE et al., 2017; Sadasivuni et al., 2020].

- PVB [Polyvinyl butyral] : avec l'ajout d'argent, ce matériau possède la résistance la plus faible parmi tous les polymères et convient donc bien pour l'impression d'éléments conductibles [Joshi et al., 2020; Lei et al., 2018].

Plastique	Etat avant l'impression	Technique
Résine	Liquide	Stéréolithographie
Polyamide	Poudre	Frittage laser
ABS	Filament	Dépôt de filament fondu

Les principaux plastiques utilisés et leurs caractéristiques

Il est à noter que le haut coefficient d'expansion thermique des polymères peut causer des déformations et le détachement des différentes couches [Grassi et al., 2019].

2) Les métaux

La fabrication additive appliquée aux métaux permet d'optimiser la perte de matières alors que jusqu'à 90 % de la matière est perdue dans un usinage classique [Berchon & Luyt, 2013]. Les principaux métaux utilisés sont le titane, l'acier inoxydable et les métaux précieux (or, argent, bronze, platine), fondus à partir de moules à cire perdue, eux-même produits à l'aide des techniques de fabrication additive.

3) Autres matériaux

- céramiques et argile. Les produits ainsi obtenus nécessitent des étapes de finition, car ils sont très fragiles [Jipa & Dillenburger, 2022].
- terre : possibilité d'utiliser des matériaux locaux issu directement du site [Warnier, 2014].
- matières organiques [Sauerwein & Doubrovski, 2018]
- béton
- cellules humaines dans le cadre du Tissu Engineering (TE) [ex : impression d'un rein par le chirurgien Anthony Atala] [Langer & Vacanti, 1993; Sinha, 2020]
- cuir
- bois : pâte de bois ou pâte à papier, PLA avec des filaments de bois, cellulose, sciure ou copeaux [avec la technologie du Binder Jetting] [Bedarf et al., 2021; Brayer, 2017; Henke & Tremel, 2013; Voney et al., 2021]
- verre [Klein et al., 2015]
- matériaux alimentaires
- sable : la silice présente dans le sable peut être exploitée à l'aide de techniques proches de la SLS. On peut notamment citer l'exemple du Solar Sinter de Markus Kaiser : la lumière solaire est concentrée par une lentille et remplace le laser [Brument & Campagnoli, 2016]. Le Silicate de sodium est également parfois utilisé comme liant mais nécessite de la chaleur et est soluble à l'eau ce qui le rend très utile pour la fabrication de coffrage perdu, notamment pour les métaux [Voney et al., 2021]
- sel [Warnier, 2014]
- pierres. Elles peuvent être artificielles comme les MiniBuilder en marbre artificiel fabriquées par l'IAACC [Brayer, 2017] ou naturelle [Rael & San Fratello, 2011].
- biocomposites formés par exemple de cellulose [DRITSAS et al., 2020], de chitine [DRITSAS et al., 2020] ou encore de mycélium dont la croissance contribue à renforcer la résistance du matériau [GOIDEA et al., 2020]
- nanocomposites. Ils sont principalement utilisés pour les techniques de FDM, photopolymérisation et liage de poudre [Francis & Jain, 2015; Hansen, 2020]. L'ajout de nanocomposites au matériau principal peut permettre d'améliorer ses caractéristiques [Hansen, 2020]. Ainsi l'ajout de graphène ou de silice à de l'ABS permet de réduire son retrait [Dul et al., 2016; Gurr et al., 2008], l'ajout de nano-argiles permet de réduire l'expansion thermique [Dul et al., 2016]. Les nanocomposites peuvent également jouer un rôle dans la liaison entre les différentes strates. Les CNT [Carbon Nanotubes] ou GNP [Graphene Nanoplatelets] peuvent fortement augmenter la conductivité thermique d'un matériau [Fan et al., 2013; Zhu et al., 2017] ou son absorption de la lumière [Wei et al., 2015]. Ainsi une accélération des processus de production liés aux UV [notamment pour la SLA] peut être obtenue par augmentation des capacités d'absorption de la lumière [Qi et al., 2018].

Cette vaste palette de matériaux permet d'obtenir des objets aux caractéristiques variés [résistants à la chaleur, à l'eau, flexibles [type caoutchouc], transparents ou translucides]. Ils peuvent être classés selon leur état avant dépôt, associé à un type de fabrication [Labonnote et al., 2016] :

- solide: LOM
- visqueux : FDM
- poudreux: SLS, DMLS, E-Beam, EBF, 3DP
- liquide : SLA, DLP, Polyjet, 2PP

Solide	Visqueux	Poudreux	Liquide
Papier	ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène)	Polyamide (nylon)	Résine
PVC	PLA (Acide Polylactique)	Cuivre	Cires
Composites	Terre, argile	Aluminium	Zircons
Céramiques	PC (Polycarbonate)	Acier d'outillage	TPE (Elastomère thermoplastiques)
Silice (sable)	Polycaprolactones	Titane	
	PPSU ou PPSF (Polyphénylsulfone)	Inconel	
	Ultem	Cobalt-chrome	
	Cires	Acier inoxydable	
	Tissus/cellules	Or/platine	
	PEEK (Polyétheréthercétone)	Hastelloy	
	Mullite	Céramiques	

Solide	Visqueux	Poudreux	Liquide
	Phosphate tricalcique <u>Bé</u> ta	PEEK (Polyétheréthercéton e)	
	PVB (Polyvinyl butyral)	PMMA (Polyméthacrylate de <u>Méthile</u>)	
	PVDF Polyvinylidene Fluoride	: Plâtre	
		Graphite	

Matériaux utilisables en fabrication additive et leur état avant impression

Les techniques de fabrication additive

Les techniques de fabrication additive peuvent être regroupés dans sept catégories principales [Berchon & Luyt, 2013; Hansen, 2020] :

- extrusion de matières
- projection de matière
- projection de liant
- lamination de papier
- photopolymérisation
- fusion de lit de poudre
- dépôt d'énergie dirigée

Les différentes techniques peuvent être regroupées en trois grandes familles [photopolymérisation, liage de poudre, extrusion].

1) Photopolymérisation

Cette famille regroupe un certain nombre de techniques utilisant un matériau liquide solidifié grâce à la lumière

- Stéréolithographie [SLA]. Un réservoir est rempli de photopolymères liquides, sensibles aux ultraviolets, solidifiés par le passage d'un laser. A la fin de l'impression, il est nécessaire de rincer le produit dans un solvant puis de le nettoyer dans un four UV permettant de dissoudre les attaches et de renforcer la solidité de l'objet. Ce procédé est très précis [tolérance de 0,005mm] et permet de réaliser de très grandes pièces [jusqu'à 2m de diamètre] mais demeure coûteux [Beddiar et al., 2019; Berchon & Luyt, 2013]. Il offre un choix restreint de matériaux et donne un fini semi-transparent qui jaunit à la lumière.

- Digital Light Processing [DLP] : inventé en 1987, ce procédé expose des polymères liquides à la lumière par une puce parcourant le réservoir. Cette technique est rapide, 2 à 5 fois plus que la SLA, et permet de réduire les coûts jusqu'à 1/3 mais est moins précise [précision moyenne de 0,2mm] [Berchon & Luyt, 2013].

- Polyjet : plus tardive [commercialisation en 1999], cette technique d'impression réalise des jets successifs de photopolymères sur une surface puis les durcit par un traitement UV. Un nettoyage à l'eau est ensuite nécessaire pour éliminer les supports [gel soluble à l'eau].

- Two-Photo Polymerization [2PP] : permet la fabrication d'objets à l'échelle nanoscopique avec une résolution de 100 nm, sans support. Une solution de photopolymère est exposée à un laser à lumière pulsée. Cette technique permet d'obtenir dans un seul objet des résistances et rigidités variables en mélangeant dans des proportions choisies numériquement des résines rigides et souples [Brument & Campagnoli, 2014]

2) Liage de poudre

- Projection de liant [Binder Jetting]: Un liant est projeté pour encoller des particules déjà présentes sur un lit de poudre. Ces procédés nécessitent d'avoir une ouverture pour permettre à la poudre de s'échapper.

- Frittage laser, Selective Laser Sintering [SLS]. La fusion de fines particules de poudre est obtenue par un puissant laser. Les couches ainsi obtenues ont une épaisseur de 0,1mm, donnant un procédé assez précis et économe en matériau mais les objets produits sont assez rugueux [Berchon & Luyt, 2013].

- Direct Metal Laser Sintering [DMLS] : cette technique, analogue au frittage laser est utilisée pour l'impression 3D de métaux [acier inoxydable, acier outillage maraging [bonnes caractéristiques mécaniques], cobalt-chrome, Inconel 625, Inconel 718 et Titane 6AlV4]. Les pièces sont ensuite solidifiées dans un four.

- E-BEAM [Electric Beam Melting]: la fusion du métal est obtenue grâce à un laser à électron. Ce procédé manque parfois de précision, donne des objets moins solides et très rugueux mais est peu cher [Berchon & Luyt, 2013].

- techniques à jet d'encre : utilisation de cire fondue avec ajout d'une glue pour solidifier l'objet. Ce procédé est relativement gourmand en matière.

-Electron Beam Direct Manufacturing [EBF=EBDM] : permet l'impression 3d dans des environnements sans gravité pour une grande diversité de métaux [titane, aluminium, vanadium, fer, oxygène, cuivre, aluminium]

- Three Dimensional Printing [3DP] : Ce procédé, développé en 1993 par le MIT, permet l'impression 3D polychrome par dépôt de glue teintée sur un matériau en poudre. La pièce doit ensuite être solidifiée dans un bain de cyanoacrylate. Ce procédé permet l'impression de céramique, métal,

polymères, composites. Il est cependant obligatoire de solidifier la pièce par post-traitement.

- Fusion cinétique : production de formes 3D à partir de la fusion de poudres métalliques de titane propulsées à vitesse supersoniques. Par l'absence de chauffage du matériau, ce procédé permet d'éviter la déformation des objets.

3) Dépôt progressif de matière : Fused Deposition Modeling (FDM)

Ce procédé est le plus utilisé dans les imprimantes personnelles aujourd'hui et le moins coûteux parmi tous les procédés de fabrication additive [Joshi et al., 2020]. Il est utilisé principalement avec des thermoplastiques qui sont liquéfiés puis extrudés en couches de 0,04 mm d'épaisseur en moyenne [Jipa & Dillenburger, 2022; Muzaffar et al., 2020]. Les principaux thermoplastiques utilisés sont l'ABS et le PLA mais aussi des Polycarbonates (PC), Polycaprolactones, Polyphénylsulfones (PPSF), l'ULTEM 9085 [résistant au feu]. Ce type d'impression requiert des supports, en général imprimé dans un matériau soluble à l'eau. Seuls des matériaux ayant une viscosité relativement faible et un diamètre constant et précis peuvent être imprimés [Muzaffar et al., 2020].

4) Les techniques expérimentales

-> Impression 3d par encollage de papier (Laminated Object Manufacturing, LOM). Découpage successif de tranches de matières par un laser. Cette technique est utilisée en général pour du papier mais le plastique peut également être employée. Ce type d'impression est rapide mais peu précis et les finitions sont souvent complexes.

-> CLIP (Continuous Liquid Interface Production) : cette méthode utilisant des UV solidifiant une résine permet d'obtenir des impressions 20 à 100 fois plus rapides que les méthodes SLS ou Polyjet Printing [Stansbury & Idacavage, 2016; Tumbleston et al., 2015].

-> Nouvelles techniques permettant de s'affranchir des supports [Brument & Campagnoli, 2016]

- Fil autoportant s'inspirant des fils de soie des araignées (inventé par Lei Yu)
- Polymères thermodurcissables à prise rapide permettant de déposer la matière dans toutes les directions et plus seulement par empilement de couches successives [Mataerial]
- Impression d'un maillage sur lequel de l'air froid est projeté pour accélérer le refroidissement [Gebhard et al., 2021].

-> Nouvelles techniques permettant d'augmenter le volume d'impression [LAAM (Large Area Additive Manufacturing) ou BAAM (Big Area Additive Manufacturing)] [Labonnote et al., 2016].

- Portique (=Gantry solution) : principalement utilisé pour l'extrusion de matière (FDM), cette technique met en place une tête d'extrusion portée par un cadre en acier pouvant dépasser les 5m de surface d'impression [Khoshnevis et al., 2001; Le et al., 2012].

- Plate-forme suspendue à des câbles (=cable suspended platform). Comme précédemment, cette technique privilégie le recours aux techniques FDM. L'utilisation d'une plate-forme est moins coûteuse et plus facile à assembler et configurer qu'un portique.

- Impression en essaim (« swarm printing ») par des robots imprimantes de plus petites dimensions, et possiblement autonomisés, notamment pour leur déplacement vers le site d'impression. Les « Minibuilders » développés par l'IAAC sont un exemple de cette stratégie [Labonnote et al., 2016]. Des hypothèses de robots volants ont également été envisagées [Hunt et al., 2014]. A

l'heure actuelle ces hypothèses posent cependant des questions de stabilité en vol, de capacité de port de charge et d'autonomie des batteries [Labonnote et al., 2016].

- Pliage des formes imprimées qui seront ensuite déployées pour pouvoir imprimer plus grand que le bac de l'imprimante [Brument & Campagnoli, 2016; Labonnote et al., 2016; Tibbits & Cheung, 2012]. Deng et Chen (2014) ont développé un algorithme permettant de transformer une modélisation 3D en pliage 2D qui sera ensuite imprimé avant d'être déplié.

- Utilisation d'anciens robots d'usines : le bras permet de se déplacer dans de nombreuses directions et d'imprimer des objets de grandes dimensions [Howe et al., 2015; Labonnote et al., 2016; Warnier, 2014].

Alors que l'impression à l'aide d'un portique, d'une plate-forme suspendue ou d'un bras robotique montrent aujourd'hui des mises en application industrielles, les autres solutions sont toujours aujourd'hui à un stade expérimental [Labonnote et al.]. Le recours à ces techniques permet la construction additive, ou l'impression de bâtiments en grandeur

Il est à noter qu'en imprimant plus grand, se pose une problématique concernant la température du matériau [Choo et al., 2019] : si celui est trop chaud, apparaît un risque de déformation [la couche inférieure n'est pas descendue en dessous de la température de transition vitreuse et n'est donc pas assez rigide pour servir de support à la couche précédente] et si sa température est trop faible, la liaison entre les différentes strates est de mauvaise qualité. Il est peut être nécessaire de définir un temps d'arrêt entre chaque couche pour permettre une solidification suffisante du modèle. Certains logiciels de « slicing » sont aujourd'hui capables d'estimer le temps d'attente nécessaire entre chaque couche mais une impression continue est plus efficace, il est donc problématique de devoir mettre en pause l'extrusion. Ce problème est d'autant plus important que les murs sont épais.

-> Foam 3D Printing [F3DP]. Cette technique permet de créer des objets solides constitués de structures microcellulaires [Bedarf et al., 2021]. Les matériaux pouvant être utilisés à cette fin sont principalement le polyuréthane [Furet et al., 2019; Keating & Oxman, 2013], la céramique [Rabinskiy et al., 2016], le cuivre [Miyajiri et al., 2020], l'acier [Meenashisundaram et al., 2020]. Les objets ainsi obtenus sont très inflammables, il est donc nécessaire d'ajouter des retardateurs de feu [Y. Liu et al., 2012]. Différentes techniques existent pour produire des F3DP :

- Extrusion-printing [similaire au FDM]

- Spray-printing [projection du médium dans de l'air comprimé, plus rapide que les autres méthodes] [Keating & Oxman, 2013; Samec et al., 2019]

- Binder jetting : résolution très précise mais la fabrication est lente. La création de porte-à-faux est possible [Miyajiri et al., 2020; Rabinskiy et al., 2016].

Ces méthodes restent très expérimentales mais des perspectives apparaissent, notamment dans la construction d'éléments de façades à haute performance [Bedarf et al., 2021; Grassi et al., 2019; Guergis et al., s. d.; Sarakinioti et al., 2018] et de coffrages perdus isolants [Furet et al., 2019].

-> Water-based robotic fabrication : permet la fabrication d'hydrogels biodégradables composites, à partir d'éléments recyclés et composés de biopolymères, par exemple de chitine, cellulose ou encore pectine [Mogas-Soldevila, 2015].

-> Glass 3D Printing [G3DP] [Klein et al., 2015]

Applications

1) Optimisation topologique

L'optimisation topologique permet de concentrer la matière aux endroits les plus sollicités pour obtenir un volume optimal avec une résistance maximale. L'optimisation topologique peut avoir pour but une réduction du volume ou une augmentation de la résistance. Dans le cadre de la fabrication additive, l'optimisation topologique permet de diminuer fortement la quantité de matériel utilisé [Bagsik et al., 2014; Labonnote et al., 2016]. Jipa & Bernhard [2016] affirment avoir réduit la consommation de matière de 70% grâce à l'optimisation topologique. Au-delà de l'augmentation des résistances mécaniques et de la diminution de la quantité de matière utilisée, l'optimisation topologique peut servir à optimiser d'autres caractéristiques des objets imprimés, comme les transferts de chaleur. Il est cependant intéressant de noter que la diminution de la masse des éléments de construction, favorable dans une optique de développement durable et d'économie de matière, est également défavorable pour l'isolation thermique et acoustique, l'inertie et le retardement du feu [Jipa et al., 2018]. Une autre approche peut être la fabrication de « Fonctionnally Graded Materials » [FGM] dont la composition et la structure varient au sein de l'objet en fonction des besoins, principalement mécaniques mais également thermiques ou acoustiques [Craveiro et al., 2013; Labonnote et al., 2016]. Labonnote et al., [2016] proposent de ne pas réaliser une véritable optimisation topologique de chaque composant, ce qui induirait une importante augmentation des coûts et du travail nécessaires, mais une optimisation plus générale de composants répétés ce qui permettrait une véritable diminution de la masse sans trop d'efforts.

2) Lattices

Les lattices sont des structures formées par la combinaison d'éléments filaires et de nœuds [Leonardi et al., 2019]. Elles offrent un excellent ratio entre leur masse et leurs caractéristiques mécaniques et permettent d'obtenir des objets légers mais résistants aux forces mécaniques [Naboni et al., 2020]. Les caractéristiques des structures lattices sont [Hadi et al., 2015] :

- une organisation spatiale en treillis
- un motif géométrique répété pour former la structure et subissant ou non des déformations
- une importante porosité [>90%]
- un excellent ratio performance/masse

Les structures en lattice peuvent être divisées entre lattices périodiques et lattices stochastiques ou hétérogènes [Tang & Zhao, 2018]. Les lattices hétérogènes sont obtenues à partir d'une lattice période dont le gradient ou la taille des cellules ont été modifiés [Leonardi et al., 2019]. Au contraire des formes traditionnelles opposant le plein et le vide, les lattices permettent d'obtenir des gradients selon trois critères: la rigidité, la distribution de la masse et la structure [Huang, 2016]. Les lattices peuvent permettre, notamment en combinaison avec les stratégies d'optimisation topologique, d'augmenter les capacités mécaniques ou thermiques d'une structure ou bien de l'alléger [Li et al., 2019; Panesar et al., 2018]. Elles permettent notamment une absorption des chocs mécaniques et une isolation thermique ou acoustique. Une attention particulière doit être portée aux jonctions entre les différentes unités puisque ce sont elles qui permettent la continuité des forces [Naboni et al., 2020]. De nombreuses lattices trouvent leurs inspirations dans les structures cellulaires organiques, comme les cellules des ruches, les cellules osseuses, les éponges et les coraux,... [Gibson et al., 2010]. Les résultats souhaités peuvent également être obtenus avec une impression

multi-matériaux, avec différents matériaux aux caractéristiques différentes [Primo et al., 2017; Stanković et al., 2015; Y. Wang et al., 2018]. Interrogeant la question de la mise à l'échelle pour la construction de ces cellules. Naboni et al., [2020] ont montré qu'une taille pour chacune des unités comprise entre 30mm et 120 mm représente la meilleure solution. La fabrication additive permet d'imprimer un moule [Gaudillière et al., 2018; Morel & Schwartz, 2015] ou directement les lattices [Cheung, 2012; Hack & Lauer, 2014].

3) Conception paramétrique

La conception paramétrique peut être définie comme « un procédé basé sur des algorithmes permettant l'expression de paramètres et de règles qui, ensemble, définissent des codes et clarifient les relations entre les intentions de conception et la réponse » [Jabi et al., 2013]. Elle transforme les designers de « form maker » en « form finder » [[Kolarevic], 2003].

Le design paramétrique permet la customisation de masse c'est-à-dire la fabrication de produits faits sur mesure pour le client à des coûts similaires à ceux de la production de masse [Gardiner, 2011; Kaplan & Haenlein, 2006; Mahamood et al., 2014]. Il autorise un choix parmi une sélection prédéfinie de caractéristiques pour remplir les besoins des consommateurs et procure la satisfaction d'avoir un produit personnalisé et unique [Schreier, 2006; Stoetzel, 2012].

Une des stratégies utilisables est celle des algorithmes génétiques, basés sur les théories darwinistes d'évolution des populations biologiques [Goldberg, 1989] avec un opérateur génétique de croisements et un opérateurs génétique de mutations à la recherche d'un optimum global. A chaque génération, la « population » obtenue est plus performante que la population précédente [performance mesurée par la méthode des éléments finis].

4) La construction additive

La construction additive peut être définie comme « un procédé de liaison des matériaux pour créer une construction à partir d'un modèle 3D » [Labonnote et al., 2016]. La construction représente aujourd'hui 3 % du marché mondial total de la fabrication additive [Beddiar et al., 2019] notamment par le biais des techniques d'impression du béton qui concentrent aujourd'hui la majorité des recherches [Labonnote et al., 2016]. Celles-ci sont classées en deux grandes catégories : les impressions dite « directes » par dépôt de béton et les impressions indirectes par impression d'un coffrage.

a. L'impression directe, Direct Digital Fabrication with Concrete (DDFC)

L'impression directe se fait par dépôt de couches successives de béton. Ce type d'impression est encore limité, par manque de résistance, à des structures soumises à de faibles contraintes mécaniques [Gebhard et al., 2021]. Leurs résistances mécaniques sont effet plus proches de la maçonnerie que du béton [Asprone et al., 2018; Menna et al., 2020]. Par ailleurs, la résistance est encore diminuée en cas de discontinuité entre les couches [Anton et al., 2021]. Quelques tentatives ont été faites pour améliorer la résistance des éléments , notamment par post-contrainte [Lim et al., 2011; Salet et al., 2018] mais il ne semble pas y avoir eu d'essai de pré-contrainte [Gebhard et al., 2021]. Du béton renforcé de fibre [Fibre Reinforced Concrete, FRC] a également été employé mais l'obligation d'utiliser de petites fibres [pour rendre le matériel pompable] limite l'utilité d'une telle méthode [Gebhard et al., 2021]. Il est à noter que les matériaux issus de la fabrication additive présentent une forte anisotropie mécanique avec une plus grande résistance en compression et en tension dans le sens des fibres [Grassi et al., 2019; Le et al., 2012; Strauss, 2013]. Il est ainsi possible d'augmenter les résistances mécaniques en alignant les strates d'impression dans le sens des contraintes . Naboni et al. [2020] proposent de moduler l'épaisseur des strates afin de

compenser l'anisotropie due au chemin d'impression et d'obtenir un matériau isotrope. Par ailleurs, contrairement à la construction traditionnelle, le béton imprimé doit être capable de supporter des charges avant même la prise ce qui est antagoniste des besoins en pompabilité et extrudabilité [Lim et al., 2011; Lowke et al., 2018; Strauss, 2013]. Les techniques d'impression directe du béton se divisent en trois catégories [Buswell et al., 2020; Grassi et al., 2019] :

-->3D Concrete Printing = Freeform Construction [3DCP] : utilisation d'un mélange de ciment de Portland et de Ciment d'Aluminium de Calcium extrudé à partir d'une tête d'extrusion similaire à celles utilisées en FDM [Anton et al., 2020; Buswell et al., 2007, 2020]. La précision demeure encore relativement faible avec une marge d'erreur comprise entre 15 et 20mm [Anton et al., 2020; Voney et al., 2021]

-->Contour Crafting = Material Deposition Modelling [MDM]

--> D shape [projection d'un liant=Binder Jetting]

- SCA [Selective Cement Activation] : eau pulvérisée sur un lit d'agrégat et permettant ainsi d'activer le ciment et de solidifier l'objet à produire.

- SPI [Selective Paste Intrusion]: Extrusion du ciment là où le mélange d'agrégat doit se solidifier. Des recherches ont été menées pour obtenir un liant plus « vert » que le ciment [Voney et al., 2021], avec notamment des géopolymères organiques pouvant être obtenus à partir de divers matériaux sources de silicate d'aluminium [cendres, déchets de verre, laitier [Cheng & Chiu, 2003], débris de briques [Rovnanik et al., 2016]...]. Le silicate d'aluminium est activé par une solution alcaline qui permet le réarrangement des atomes de silice et d'aluminium [Sotelo-Piña et al., 2019] [Ces nouveaux bétons sont résistants à l'eau et au feu [Cheng & Chiu, 2003], ont un faible impact environnemental [Habert & Ouellet-Plamondon, 2016] et n'émettent pas de COV mais leurs résistances mécaniques demeurent encore assez faible [Xia & Sanjayan, 2016] Par ailleurs, il est intéressant de noter que la préfabrication permet d'accéder à des machines mieux calibrées et d'imprimer les objets dans un sens différents de celui où ils seront utilisés La durabilité de tels éléments reste encore très faible : Des colonnes exposées 10 mois à l'air extérieur et au gel présentent des craquements visibles à l'oeil nu [Anton et al., 2021].

b) L'impression indirecte, Digital Fabrication of Framework [DFF]

L'impression indirecte consiste à produire un coffrage par fabrication additive puis à couler du béton à l'intérieur. L'impression de coffrage peut avoir un impact important dans le domaine de la construction car ceux-ci représentent souvent le coût le plus élevé pour les formes complexes et plus de la moitié des ressources [Jipa & Dillenburger, 2022]. Différentes stratégies sont étudiées pour limiter l'impact des coffrages [Jipa & Dillenburger, 2022] :

- utiliser des coffrages fin en optimisant la consommation de ressources mais des problèmes subsistent pour faire des coffrages vraiment fins car la pression dépasse alors les capacités du coffrage. Cette problématique peut être surmontée en tournant l'objet à couler pour diminuer la hauteur [Jipa et al., 2018] ou en mettant un matériau pour contrer la pression de l'autre côté du coffrage [par exemple du sable ou l'eau].

- produire des coffrages robustes pouvant être réutilisés. Cette méthode reste encore peu courante [Roschli et al., 2018 ; Jipa et Dillenburger, 2022]

- produire un coffrage perdu conférant de nouvelles caractéristiques à l'élément de construction (ex : protection contre le feu, propriétés acoustiques , isolation, protection contre le gel...)

- produire un coffrage structurel : sorte de coffrage perdu agissant comme un matériau composite en coopération avec le béton [par exemple en améliorant la résistance au cisaillement]. Les matériaux utilisés en impression 3D demeurent limités dans ce domaine mais le nylon peut partiellement jouer ce rôle [Hack et Lauer, 2014 ; Jipa et Dillenburger, 2022].

- produire un coffrage à l'aide d'un matériau réutilisable. Ainsi l'impression à jet d'encre permet d'utiliser de la cire sans ajout de glue. Après prise de l'objet, la cire peut être utilisée [Gardiner et al., 2016; Gardiner & Janssen, 2014]. L'argile peut être utilisée dans le même but avec des méthodes FDM. Les coffrages ainsi produits sont faciles à démouler grâce à la solubilité de l'argile dans l'eau [A. Jipa & Dillenburger, 2022; Wang et al., 2017].

A l'heure actuelle, l'impression de coffrage demeure non compétitive avec les méthodes de production d'éléments standards, à l'exception des situations complexes [Jipa & Dillenburger, 2022]. Ainsi un coffrage imprimé est huit fois moins coûteux qu'un coffrage produit par CNC [Agustí-Juan et al., 2019], sans cependant prendre en compte le temps de conception nécessaire. L'impression des coffrages demande un long temps de production, un investissement coûteux en équipement, un personnel formé, possiblement une nouvelle formulation de béton...Par ailleurs, les coffrages produits par fabrication additive présentent bien souvent une texture non souhaitée dans le produit fini. Il est cependant possible de faire disparaître la texture du coffrage par différentes méthodes (solvant, chaleur, CNC, enrobage) [Anton et al., 2020; A. Jipa & Dillenburger, 2022; Roschli et al., s. d.]. L'utilisation de la technique du Binder Jetting est également une alternative. Les coffrages ainsi produits sont très peu rugueux grâce à la très résolution horizontale, de l'ordre de 100 micromètre [Anton et al., 2020]. La fabrication additive de coffrage présente cependant des limites, en terme de temps de fabrication et robustesse malgré de nombreux avantages [réduction du poids, intégration de différentes fonctions, nouvelles esthétiques, automatisation des process,...].

« Smart Structure »

Les « smart structures » font références à des bâtiments aux fonctionnalités augmentées [Labonnote et al., 2016], comme l'adaptation au soleil, les technologies de maintenance des bâtiments, les matériaux s'auto-réparant, ... [Rael & San Fratello, 2011]

5) Impression 4D

L'impression 4D désigne le changement de formes ou de fonctions d'un objet une fois imprimé [Sadasivuni et al., 2020], notamment sous l'effet de la température [Ding et al., 2018], de l'humidité [Mulakkal et al., 2018], du pH [Muzaffar et al., 2020], de l'électricité [Joe Lopes et al., 2012], de réactions chimiques ou de la lumière [F. Liu & Urban, 2010; Y. Liu et al., 2012] [Liu et Urban, 2010; Liu et al., 2012]. Ces changements sont le plus souvent réversibles [Muzaffar et al., 2020] et permettent de créer des structures s'auto-assemblant (origamis actifs, pliages séquentiels,...)[Singh et al., 2010]. L'impression 4D fait notamment appel à des matériaux ayant de bonnes conductivités thermiques et électriques [CNT (Carbon nanotubes), graphite, oxyde de métal] [Sadasivuni et al., 2020]. Il est également possible d'imprimer des composites conductibles [CPS : Conductive Polymer Composites] pour construire la 4D à partir de signaux électriques mais il est nécessaire de trouver un équilibre pour éviter une viscosité trop haute ou une conductivité trop faible [Joshi et al., 2020].

Potentiels et limites

1) Les avantages de la fabrication additive :

- Rendre la fabrication accessible à tous [Diez, 2012; Leblanc, 2014]
- Fabriquer des géométries complexes sans coût de production supplémentaire [Anastasiou et al., 2013]. Il est ainsi possible de réaliser des pièces uniques à la demande sans coût supplémentaire et d'accéder à la customisation de masse [Gardiner, 2011; Mahamood et al., 2014]

- Fabriquer des objets sans assemblage : raccourcissement de la chaîne de production et réduction des coûts. Il est donc possible de produire des objets en faible quantité et de réaliser du prototypage rapide [Sadasivuni et al., 2020]
- Possibilité d'allonger la durée de vie des objets en remplaçant les pièces [Despeisse et al., 2017]
- En construction, la fabrication additive permet de produire des éléments creux pour y introduire les réseaux [Anton et al., 2021; Bedarf et al., 2021; Khoshnevis, 2004]
- possibilité d'obtenir des matériaux combinant différentes propriétés [résistance aux charges, isolation thermique, acoustique, résistance au feu,...] [Chianrabutra et al., s. d.; Pegna et al., s. d.]
- production d'objets contextualisés, c'est-à-dire adapté avant leur impression aux lieux d'utilisation [Kwon & Jang, 2010]
- faciliter la construction dans les environnements hostiles [Buswell et al., 2007; Howe et al., 2015] ou la construction d'abris en cas de guerre ou de catastrophes naturelles avec des structures pouvant facilement et rapidement être déployées [Hunt et al., 2014]. Des projets de construction extraterrestre, sur la Lune par exemple, ont également été publiés [Ceccanti, 2010.; Khoshnevis, 2004; Rousek et al., 2012]- Réduction des déchets et recyclage d'une partie d'entre eux pendant le cycle suivant de production [Pegna, 1997 ;Rael et San Fratello, 2011 ; Berman, 2012; Achillas et al., 2015]
- Réduction significative de l'empreinte carbone, par le biais notamment de la réduction des quantités de matières, des déchets et des besoins en transport (à la fois pour les matières premières et les ouvriers dans le cadre de la construction additive) [Achillas et al., 2015; Strauss, 2013]

2) Les limites de la fabrication additive

- strates visibles
- Porte-à-faux limités [Gardiner, 2011; Leblanc, 2014] notamment pour les technologies d'extrusion utilisant des matériaux à l'état liquide ou visqueux [Bai et al., 2013; Labonnote et al., 2016]
- Coûts : la fabrication additive peut s'avérer onéreuse et n'est pas compétitive pour les objets simples. Elle demande par ailleurs un fort investissement en matériels avec des machines pouvant se dégrader rapidement. On note en particulier le cas des pompes pour l'impression directe du béton liée à la forte abrasivité du ciment [Labonnote et al., 2016]
- Durée de fabrication
- Nécessité de formation [Sadasivuni et al., 2020]
- Manque de résistances mécaniques, en particulier dans le cadre de la construction additive [Labonnote et al., 2016]
- Questionnement sur la propriété intellectuelle avec la possibilité de copier des objets [Sadasivuni et al., 2020]
- une empreinte carbone plus importante que pour les pièces manufacturées de façon traditionnelle [Hansen, 2020; Rejeski et al., 2018].

Conclusion

La fabrication additive et les différentes techniques associées semblent annoncer une troisième révolution industrielle. Elle permet de raccourcir les chaînes de production et favorise la création de formes complexes. Cependant son utilisation en masse doit encore surmonter certains écueils. Il est en particulier nécessaire de repenser nos modes de concevoir pour les adapter à la fabrication additive.

Références bibliographiques

- Achillas, Ch., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymanidis, M., & Tzetzis, D. [2015]. A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.014>
- Agusti-Juan, I., Jipa, A., & Habert, G. [2019]. Environmental assessment of multi-functional building elements constructed with digital fabrication techniques. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(6), 1027-1039. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1563-4>
- Anastasiou, A., Tsirmpas, C., Rompas, A., Giokas, K., & Koutsouris, D. [2013]. 3D printing : Basic concepts mathematics and technologies. 13th IEEE International Conference on Bioinformatics and BioEngineering, 1-4. <https://doi.org/10.1109/BIBE.2013.6701672>
- Anton, A., Jipa, A., Reiter, L., & Dillenburger, B. [2020]. Fast Complexity: Additive Manufacturing for Prefabricated Concrete Slabs. In F. P. Bos, S. S. Lucas, R. J. M. Wolfs, & T. A. M. Salet (Eds.), *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication* (p. 1067-1077). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_102
- Anton, A., Reiter, L., Wangler, T., Franze, V., Flatt, R. J., & Dillenburger, B. [2021]. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. *Automation in Construction*, 122, 103467. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103467>
- Asprone, D., Menna, C., Bos, F. P., Salet, T. A. M., Mata-Falcón, J., & Kaufmann, W. [2018]. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 111, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.020>
- Bagsik, A., Josupeit, S., Schoeppner, V., & Klomp, E. [2014]. Mechanical analysis of lightweight constructions manufactured with fused deposition modeling. *AIP Conference Proceedings*, 1593(1), 696-701. <https://doi.org/10.1063/1.4873874>
- Bai, X. W., Zhang, H. D., & Wang, G. L. [2013]. Electromagnetically Confined Weld-based Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 6, 515-520. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.084>
- Bedarf, P., Dutta, A., Zanini, M., & Dillenburger, B. [2021]. Foam 3D printing for construction : A review of applications, materials, and processes. *Automation in Construction*, 130, 103861. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103861>
- Beddiar, K., Grellet, C., & Woods, E. [2019]. Fabrication additive et impression 3D. In *Construction 4.0 : Réinventer le bâtiment grâce au numérique BIM, DfMA, Lean Management* (p. 100-108). Dundee.
- Berchon, M., & Luyt, B. [2013]. L'impression 3D. Eyrolles.
- Brayer, M.-A. [2017]. *Imprimer le monde : Exposition, Paris, Centre Pompidou, Galerie 4, 15 mars-19 juin 2017*. Éditions Hx Editions du Centre Pompidou.
- Brument, F., & Campagnoli, M. [2016]. *Impression 3D, l'usine du futur : 70 créations innovantes*. Dundee.
- Buswell, F. A., da Silva, W. R. L., Bos, F. P., Schipper, H. R., Lowe, D., Hack, N., Kloft, H., Mechtcherine, V., Wangler, T., & Roussel, N. [2020]. A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. *Cement and Concrete Research*, 134, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106068>
- Buswell, R. A., Saar, R. C., Gibb, A. G. F., & Thorpe, A. [2007]. Freeform Construction : Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>
- Caccanti, F. (s. d.). *1AC-10-D3.3.5 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR A MOON OUTPOST EXPLOITING LUNAR SOIL*. 9.
- Cheng, T. W., & Chiu, J. P. [2003]. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205-210. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6)
- Cheng, K. C.-W. [2012]. *Digital cellular solids : Reconfigurable composite materials* [Thesis, Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/78199>
- Cheungrubra, S., Mellor, B. C., & Yang, S. (s. d.). *A Dry Powder Material Delivery Device for Multiple Material Additive Manufacturing*. 13.
- Choo, K., Friedrich, B., Daugherty, T., Schmidt, A., Patterson, C., Abraham, M. A., Conner, B., Rogers, K., Cortes, P., & MacDonald, E. [2019]. Heat retention modeling of large area additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 28, 325-332. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.014>
- Craveiro, F., Bártolo, H., & Bártolo, P. J. [2013]. Functionally Graded Structures through Building Manufacturing. *Advanced Materials Research*, 683, 775-778. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.683.775>
- Despeisse, M., Bauners, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S. J., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T. H. W., Mortara, L., Reed-Tsochos, F. P., & Rowley, J. [2017]. Unlocking value for a circular economy through 3D printing : A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 115, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>
- Diez, T. [2012]. *Personal Fabrication : Fab Labs as Platforms for Citizen-Based Innovation, from Microcontrollers to Cities*. *Nexus Network Journal*, 14(3), 457-468. <https://doi.org/10.1007/s00004-012-0131-7>
- Ding, Z., Weeger, O., Qi, H. J., & Dunn, M. L. [2018]. 4D rods : 3D structures via programmable 1D composite rods. *Materials & Design*, 137, 256-265. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.004>
- Doyle, S. E. H. [2019]. *Dissolvable 3D Printed Formwork*. *ACADIA 19:UBIQUITY AND AUTONOMY* [Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-59179-7] [The University of Texas at Austin School of Architecture, Austin, Texas 21-26 October, 2019] pp. 178-187. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19_178
- DRITSAS, S., VIJAY, Y., HALIM, S., TEO, R., SANANDIYA, N., FERNANDEZ, J. G., BURRY, J., SABIN, J., SHEIL, B., & SKAVARA, M. [2020]. CELLULOSIC BIOCOMPOSITES FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING. In *Fabricate 2020* [p. 74-81]. UCL Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsw14>
- Dul, S., Fambri, L., & Pegoretti, A. [2016]. Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.011>
- Fan, L.-W., Fang, X., Wang, X., Zeng, Y., Xiao, Y.-Q., Yu, Z.-T., Xu, X., Hu, Y.-C., & Cen, K.-F. [2013]. Effects of various carbon nanofillers on the thermal conductivity and energy storage properties of paraffin-based nanocomposite phase change materials. *Applied Energy*, 110, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.043>
- Francis, V., & Jain, P. K. [2015]. Advances in nanocomposite materials for additive manufacturing. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(3-4), 215-233. <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2015.074804>
- Furet, B., Poullain, P., & Garnier, S. [2019]. 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. *Additive Manufacturing*, 28, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.002>
- Gardiner, J. [2011]. Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing - Project Led Architectural Research. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11676.28807>
- Gardiner, J., & Janssen, S. [2014]. FreeFab - Development of a Construction-Scale Robotic Formwork 3D Printer [p. 131-146]. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04663-1_9
- Gardiner, J., Janssen, S., & Kirchner, N. [2016, Juillet 17]. A Realisation of a Construction Scale Robotic System for 3D Printing of Complex Formwork. *ISARC 2016/0062*
- Gaudillière, N., Duballet, R., Bouyssou, C., Mallet, A., Roux, P., Zakeri, M., & Dirrenberger, J. [2018]. Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (p. 459-472). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2_35
- Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., & Kaufmann, W. [2021]. Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures*, 240, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112380>
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Harley, B. A. C. [2010]. Cellular materials in nature and medicine. *Cumbridge Univ. Press*.
- GOLDEA, A., FLOUDAS, D., ANDREEN, D., BURRY, J., SABIN, J., SHEIL, B., & SKAVARA, M. [2020]. PULP FACTION : 3D PRINTED MATERIAL ASSEMBLIES THROUGH MICROBIAL BIOTRANSFORMATION. In *Fabricate 2020* [p. 42-49]. UCL Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsw10>
- Goldberg, D. E. [1989]. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* [1er édition]. Addison Wesley.
- Grassi, G., Lupica Spagnolo, S., & Paolletti, I. [2019]. Fabrication and durability testing of a 3D printed façade for desert climates. *Additive Manufacturing*, 28, 439-444. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.023>
- Gueorgis, M., Eikevik, L., Tryggestad, L., Obendorf, A., Enquist, P., Lee, B., Gowda, A., Post, B., Biswas, K., & Shultz, J. (s. d.). High performance 3D printed façade with integrated energy : Built works and advancements in computational simulation. *Advanced Buildign Skins*. Consulté 3 juin 2022, à l'adresse <https://softboundaries.com/wp-content/uploads/2020/10/10-1016-1016-high-performance-3D-printed-facade-with-integrated-ener-gy.pdf>
- Gurr, M., Hofmann, D., Ehm, M., Thomann, Y., Kübler, R., & Mülhaupt, R. [2008]. Acrylic Nanocomposite Resins for Use in Stereolithography and Structural Light Modulation Based Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing Technologies. *Advanced Functional Materials*, 18(16), 2390-2397. <https://doi.org/10.1002/adfm.200800344>
- Habert, G., & Quellet-Plamondon, C. [2016]. Recent update on the environmental impact of geopolymers. *RILEM Technical Letters*, 7.
- Hack, N., & Lauer, willi viktor. [2014]. Mesh-Mould : Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork. *Architectural Design*, 84. <https://doi.org/10.1002/ad.1753>
- Hadi, A., Vignat, F., & Villeneuve, F. [2015]. Design Configurations and Creation of Lattice Structures for Metallic Additive Manufacturing. 9.
- Hansen, C. J. [2020]. Chapter 2 - 3D and 4D printing of nanomaterials : Processing considerations for reliable printed nanocomposites. In K. K. Sadasivani, K. Deshmukh, & M. A. Almaadeed (Eds.), 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials [p. 25-44]. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818605-9.00002-8>
- Henke, K., & Tremel, S. [2013]. Wood based bulk material in 3D printing processes for applications in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1), 139-141. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0658-z>
- Howe, A., Wilcox, B., Mcquin, C., Mittman, D., Townsend, J., Polit Casillas, R., & Litwin, T. [2015]. Modular Additive Construction Using Native Materials. 301-312. <https://doi.org/10.1061/9780784479179.034>

Huang, A. [2016]. From Bones to Bricks : Design the 3D Printed Durotaxis Chair and La Burbuja Lamp. ACADIA // 2016: POSTHUMAN FRONTIERS: Data, Designers, and Cognitive Machines [Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-692-77095-5] Ann Arbor 27-29 October, 2016, pp. 318-325. https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia16_318

Hunt, G., Mizilalis, F., Alhina, T., Hooper, P. A., & Kovac, M. [2014]. 3D printing with flying robots. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 4493-4499. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907515>

Jabi, W., Woodbury, R., & Johnson, B. [2013]. Parametric Design for Architecture [1er édition]. Laurence King Publishing.

Jipa, A., & Bernhard, M. [2016]. Printed Stay-in-Place-Formwork for Topologically Optimized Concrete Slab. 3, 16.

Jipa, A., & Dillenburger, B. [2022]. 3D Printed Formwork for Concrete : State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. 3D Printing and Additive Manufacturing, 9(2), 84-107. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024>

Jipa, M.-A., Aghaei Melbodi, M., Giesecke, R., Shammas, D., Leschok, M., Bernhard, M., & Dillenburger, B. [2018, novembre 28]. 3D-Printed Formwork for Prefabricated Concrete Slabs. 1st International Conference on 3D Construction Printing (3DcP). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000507651>

Joe Lopes, A., MacDonald, E., & Wicker, R. B. [2012]. Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. Rapid Prototyping Journal, 18(2), 129-143. <https://doi.org/10.1108/13552541211212113>

Joshi, A., Goh, J. K., & Goh, K. E. J. [2020]. Chapter 3—Polymer-based conductive composites for 3D and 4D printing of electrical circuits. In K. K. Sadasivuni, K. Deshmukh, & M. A. AlMaadeed (Eds.), 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials [p. 45-83]. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00003-x>

Kaplan, A. M., & Haelein, M. [2006]. Toward a Parsimonious Definition of Traditional and Electronic Mass Customization. Journal of Product Innovation Management, 23(2), 168-182. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2006.00190.x>

Keating, S., & Oxman, N. [2013]. Compound fabrication : A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(6), 439-448. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.05.001>

Khoshevis, B. [2004]. Automated construction by contour crafting—Related robotics and information technologies. Automation in Construction, 13(1), 5-19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>

Khoshevis, B., Russell, R., Kwon, H., & Bukkapatnam, S. [2001]. Crafting large prototypes. IEEE Robotics & Automation Magazine, 8(3), 33-42. <https://doi.org/10.1109/109.1056812>

Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J. C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M., & Oxman, N. [2015]. Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2(3), 92-105. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0021>

Kolaric, [2003]. DIGITAL PRODUCTION. In Architecture in the Digital Age. Taylor & Francis.

Kruger, J., Zeranek, S., & van Zijl, G. [2019]. 3D concrete printing : A lower bound analytical model for buildability performance quantification. Automation in Construction, 106, 102904. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102904>

Kwon, H., & Jang, M. [2010]. 3D Free Form Fabrication Using the Pivoting Side Trowel with Ceramic Material. Materials Science Forum - MATER SCI FORUM, 658, 268-271. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF658.268>

Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., & Rührer, P. [2016]. Additive construction : State-of-the-art, challenges and opportunities. Automation in Construction, 72, 347-366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>

Langer, R., & Vacanti, J. P. [1993]. Tissue Engineering. Science, 260(5110), 920-926. <https://doi.org/10.1126/science.8493529>

Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. [2012]. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and Structures, 45(8), 1221-1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>

Leblanc, F. [2014]. Anything, Anyone, Anywhere. Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterfactuals, Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2014) / Kyoto 14-16 May 2014, pp. 461-470. https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2014_244

Lei, Z., Chen, Z., Peng, H., Shen, Y., Feng, W., Liu, Y., Zhang, Z., & Chen, Y. [2018]. Fabrication of highly electrical conductive composite filaments for 3D-printing circuits. Journal of Materials Science, 53(20), 14495-14505. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2645-1>

Leschok, M., & Dillenburger, B. [2020]. Sustainable Thin-Shell 3D Printed Formwork for Concrete. In C. Gengnagel, O. Baverl, J. Burry, M. Ramsgaard Thomsen, & S. Weinzirl (Eds.), Impact : Design With All Senses [p. 487-501]. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6_38

Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. [2012]. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction, 21, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>

Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Wackrow, R., Austin, S., Gibb, A., & Thorpe, A. [2011]. Development of a viable concrete printing process. Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011.

Liu, F., & Urban, M. W. [2010]. Recent advances and challenges in designing stimuli-responsive polymers. Progress in Polymer Science, 35(1), 3-23. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.10.002>

Liu, Y., Boyles, J. K., Genzer, J., & Dickey, M. D. [2012]. Self-folding of polymer sheets using local light absorption. Soft Matter, 8(6), 1764-1769. <https://doi.org/10.1039/C1SM06564E>

Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., & Dillenburger, B. [2018]. Particle-bed 3D printing in concrete construction - Possibilities and challenges. Cement and Concrete Research, 112, 50-65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>

Mahamood, R. M., Akinlabi, E., Shukla, D. M., & Pitiyana, S. [2014]. Revolutionary Additive Manufacturing : An Overview. Lasers in Engineering, 27, 161-178.

MC GEE, W., VELIKOV, K., THUN, G., TISH, D., MENGES, A., SHEIL, B., GLYNN, R., & SKAVARA, M. [2017]. INFUNDIBLEWORKS : KINETIC SYSTEMS, ADDITIVE MANUFACTURING FOR CABLE NETS AND TENSILE SURFACE CONTROL. In Fabricate 2017 [p. 84-91]. UCL Press. <https://doi.org/10.2307/ctc1n17qkg15>

Meenahisundaram, G. K., Xu, Z., Nai, M. L. S., Lu, S., Ten, J. S., & Wei, J. [2020]. Binder Jetting Additive Manufacturing of High Porosity 316L Stainless Steel Metal Foams. Materials, 13(17), 3744. <https://doi.org/10.3390/ma13173744>

Menna, C., Mata-Falcón, J., Bos, F. P., Vantghem, G., Ferrara, L., Asprone, D., Salet, T., & Kaufmann, W. [2020]. Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. Cement and Concrete Research, 133, 106079. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106079>

Miyajiri, H., Ma, D., Atwater, M. A., Darling, K. A., Hammond, V. H., & Williams, C. B. [2020]. Binder jetting additive manufacturing of copper foam structures. Additive Manufacturing, 32, 100960. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100960>

Mogas-Soldevila, L. [2015]. Water-based digital design and fabrication : Material, product, and architectural explorations in printing chitosan and its composites.

Morel, P., & Schwartz, T. [2015]. Automated Casting Systems for Spatial Concrete Lattices [p. 213-223]. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24208-8_18

Mulakkal, M. C., Trask, R. S., Ting, V. P., & Seddon, A. M. [2018]. Responsive cellulose-hydrogel composite ink for 4D printing. Materials & Design, 160, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.009>

Muzaffar, A., Ahmed, M. B., Deshmukh, K., Kovářík, T., Kreněk, T., & Pasha, S. K. K. [2020]. Chapter 4—3D and 4D printing of pH-responsive and functional polymers and their composites. In K. K. Sadasivuni, K. Deshmukh, & M. A. AlMaadeed (Eds.), 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials [p. 85-117]. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00004-1>

Naboni, R., Kunic, A., & Brescghello, L. [2020]. Computational design, engineering and manufacturing of a material-efficient 3D printed lattice structure. International Journal of Architectural Computing, 18(4), 404-423. <https://doi.org/10.1177/1748077120947990>

OVERALL, S., RYSANY, J. P., MILLER, C., SHARPLES, W., SHARPLES, C., KUMAR, S., VITTA DINI, A., SABY, V., BURRY, J., SABIN, J., SHEIL, B., & SKAVARA, M. [2020]. DIRECT-TO-DRAWING: In Fabricate 2020 [p. 100-107]. UCL Press; JSTOR. <https://doi.org/10.2307/ctv13xpsw.17>

Panayotov, I. V., Orti, V., Cuisinier, F., & Yachouh, J. [2016]. Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 27(7), 118. <https://doi.org/10.1007/s10856-016-5731-4>

Pegna, J., Pattafatto, S., Berge, R., Bangalan, C., Herring, H., LeSaux, M., & Engler, J. [s. d.]. E SAND-PAINTER: Two-dimensional powder deposition. Proceedings of the Tenth Solid Freeform Fabrication Symposium, 16.

Qi, F., Chen, N., & Wang, Q. [2018]. Dielectric and piezoelectric properties in selective laser sintered polyamide11/BaTiO3/CNT ternary nanocomposites. Materials & Design, 143, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.050>

Rabinsky, L., Ripetsky, A., Sitnikov, S., Solovay, Y., & Kahramanov, R. [2016]. Fabrication of porous silicon nitride ceramics using binder jetting technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 140, 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/140/1/012023>

Rael, R., & San Fratello, V. [2011]. Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing, 152-157. <https://doi.org/10.52842/conf.acadica.2011.152>

Rejeski, D., Zhao, F., & Huang, Y. [2018]. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. Additive Manufacturing, 19, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>

Roschli, A., Post, B. K., Chesser, P. C., Sallias, M., Love, L. J., & Gaul, K. T. [s. d.]. PRECAST CONCRETE MOLDS FABRICATED WITH BIG AREA ADDITIVE MANUFACTURING. 13.

Roskies, M., Jordan, J. D., Fang, D., Abdallah, M.-N., Hier, M. P., Mlynarek, A., Tamimi, F., & Tran, S. D. [2016]. Improving PEEK bioactivity for craniofacial reconstruction using a 3D printed scaffold embedded with mesenchymal stem cells. Journal of Biomedical Materials Applications, 31(1), 132-139. <https://doi.org/10.1177/0885328216638636>

Rousek, T., Eriksson, K., & Doule, O. [2012]. SinterHub. Acta Astronautica - ACTA ASTRONAUTICA, 74. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.10.009>

Rovnanik, P., Řezník, B., & Rovnaníková, P. [2016]. Blended Alkali-activated Fly Ash / Brick Powder Materials. Procedia Engineering, 151, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.397>

Sadasivuni, K. K., Deshmukh, K., & AlMaadeed, M. A. (Eds.). [2020]. 3D and 4D printing of polymer nanocomposite materials : Processes, applications, and challenges. Elsevier.

Salet, T. M. A., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. M. [2018]. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. Virtual and Physical Prototyping, 13(3), 222-236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

samec, E., Srivastava, A., & Chaltiel, S. (2019). Light formwork for earthen monolithic shells. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2669095>

Sarakinioti, M. V., Turrin, M., Konstantinou, T., Tenpiernik, M., & Knaack, U. (2018). Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control. *Materials Today Communications*, 15, 275–279. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.027>

Sauerwein, M., & Doubrovski, E. L. (2018). Local and recyclable materials for additive manufacturing : 3D printing with mussel shells. *Materials Today Communications*, 15, 214–217. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.028>

Schreier, M. (2006). The value increment of mass-customized products : An empirical assessment. *Journal of Consumer Behaviour*, 5(4), 317–327. <https://doi.org/10.1002/cb.183>

Singh, M., Haverinen, H. M., Dhagat, P., & Jabbour, G. E. (2010). Inkjet Printing—Process and Its Applications. *Advanced Materials*, 22(6), 673–685. <https://doi.org/10.1002/adma.200901141>

Sinha, S. K. (2020). Chapter 5—Additive manufacturing [AM] of medical devices and scaffolds for tissue engineering based on 3D and 4D printing. In K. K. Sadasivuni, K. Deshmukh, & M. A. Almaadeed (Eds.), *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials* (p. 119–160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00005-3>

SNODKS, R., HARPER, L., BURRY, J., SABIN, J., SHEIL, B., & SKAVARA, M. (2020). PRINTED ASSEMBLAGES: In *Fabricate 2020* [p. 202–209]. UCL Press; JSTOR. <https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsvw.31>

Sotelo-Piña, C., Aguilera-González, E. N., & Martínez-Luévanos, A. (2019). Geopolymers : Past, present, and future of low carbon footprint eco-materials. In *Handbook of Ecomaterials* (p. 2765–2785). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_54

Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers : Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>

Stoetzel, M. (2012, septembre 19). Exploiting Mass Customization towards Open Innovation.

Strauss, H. (2013). *AM Envelope : The Potential of Additive Manufacturing for Façade Constructions*. TU Delft.

Tibbits, S., & Cheung, K. (2012). Programmable materials for architectural assembly and automation. *Assembly Automation*, 32(3), 216–225. <https://doi.org/10.1108/01445151211244348>

Turnbleston, J. R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D., Chen, K., Pinschmidt, R., Rolland, J. P., Ermoshkin, A., Samulski, E. T., & DeSimone, J. M. (2015). Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 347(6228), 1349–1352. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2397>

Voney, V., Ddaglia, P., Brumaud, C., Dillenburger, B., & Habert, G. (2021). From casting to 3D printing geopolymers : A proof of concept. *Cement and Concrete Research*, 143, 106374. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106374>

Wang, S., Dritsas, S., Morel, P., & Ho, K. (2017). Clay robotics : A hybrid 3D printing casting process. In F. M. da Silva, H. Bártolo, P. Bártolo, R. Almendra, F. Roseta, H. A. Almeida, & A. C. Lemos (Eds.), *Challenges for Technology Innovation : An Agenda for the Future* [1re éd., p. 83–88]. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315198101-16>

Warnier, C. (Ed.). (2014). *Printing things : Visions and essentials for 3D printing*. Gestalten.

Wei, X., Li, D., Jiang, W., Gu, Z., Wang, X., Zhang, Z., & Sun, Z. (2015). 3D Printable Graphene Composite. *Scientific Reports*, 5(1), 11181. <https://doi.org/10.1038/srep11181>

Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015). Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* (Basel, Switzerland), 8(9), 5834–5846. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>

Xia, M., & Sanjayam, J. (2016). Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications. *Materials & Design*, 110, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.136>

Xiaoyong, S., Liangcheng, C., Honglin, M., Peng, G., Zhanwei, B., & Cheng, L. (2017). Experimental Analysis of High Temperature PEEK Materials on 3D Printing Test. 2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 13–16. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2017.00012>

Zhu, D., Ren, Y., Liao, G., Jiang, S., Liu, F., Guo, J., & Xu, G. (2017). Thermal and mechanical properties of polyamide 12/graphene nanoplatelets nanocomposites and parts fabricated by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(39), 45332. <https://doi.org/10.1002/app.45332>

Workshop fab add créative

juin/juillet 2002

