

# L'impression 3D du béton

Technologies, défis, opportunités et applications





# Préface

L'objectif de cette publication est de rassembler les connaissances actuelles en matière d'impression 3D pour la réalisation d'éléments, de structures et de coffrages permanents en mortier. En effet, cette technique suscite un intérêt toujours plus croissant auprès des fabricants, des architectes, des bureaux d'études et des entreprises de construction.

Dans la littérature et la pratique quotidienne, les termes 'impression 3D du béton' désignent plus largement les projets réalisés à l'aide de matériaux cimentaires (béton) sous forme d'encres, et ce, malgré qu'elles soient considérées d'un point de vue technique comme des mortiers compte tenu de la granulométrie maximale utilisée (de 2 à 4 mm). Par conséquent, nous maintiendrons les termes 'impression 3D du béton' dans le présent document pour des raisons pratiques.

Ce procédé d'impression 3D par extrusion, appelé aussi fabrication additive, consiste à déposer le matériau (mortier) en couches successives à l'aide d'une machine d'impression (portique motorisé ou robot industriel) pilotée par un logiciel. Aujourd'hui, de nombreuses machines d'impression 3D destinées au secteur de la construction trouvent petit à petit leur place dans les ateliers de préfabrication et sur chantier.

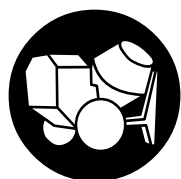
Fidèles à notre mission de centre d'innovation, nous accompagnons le secteur dans l'adoption des technologies numériques (impression 3D, cobots, drones, etc.). En matière d'impression 3D, les projets de recherche et de développement se multiplient afin de rendre le procédé toujours plus efficace. Ces avancées permettent d'anticiper une demande croissante pour une technologie ne nécessitant plus aucun coffrage et ouvrant la voie à la conception ainsi qu'à la réalisation de géométries complexes avec une économie de matière. Fort de ce constat, Buildwise pilote des projets liés à la technologie des mélanges imprimables (composition, performances mécaniques et durabilité) et des activités de démonstration organisées dans un hall qui accueille une imprimante 3D pour le mortier.

Ce document a pour second objectif de recenser les principales opportunités qui se présentent aux professionnels en matière d'impression 3D, de cibler les applications les plus pertinentes et de cerner les défis à relever. Vu l'évolution constante de l'impression 3D dans le secteur de la construction, on comprendra aisément que les informations reprises dans cette publication puissent être obsolètes à plus ou moins brève échéance.

*Ce document a été rédigé dans le cadre de C-Tech et de l'Antenne Normes Béton, Mortier et Granulats.*

**Auteurs :** Khadija El Cheikh

**Ont également contribué à l'élaboration du document :** Angelo Buttafuoco, Laurent Clabots, Stefan Danschutter, Yves Grégoire, Niels Hulsbosch, Josse Jacobs, Laurent Lassoie, Yves Martin, Julie Piérard, Valérie Pollet, Gaëtan Wégria, Jörg Wijnants et Eric Winnepenninckx (Buildwise). Damien Duvivier et Benoit Parmentier (ex-Buildwise).



# Sommaire

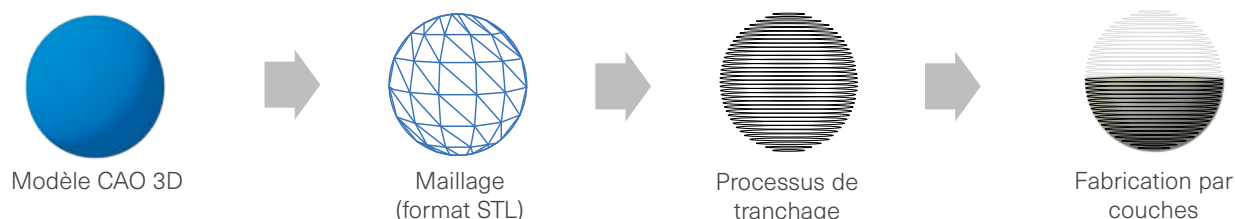
PRÉFACE	3
1. QU'EST-CE QUE L'IMPRESSION 3D ?	7
2. BRÈVE HISTOIRE DE LA CONSTRUCTION PAR IMPRESSION 3D	8
3. PROCÉDÉS D'IMPRESSION 3D DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION	11
3.1 L'extrusion	11
3.2 La liaison ou le collage par poudre	13
3.3 La soudure additive	15
4. POTENTIEL DE L'IMPRESSION 3D DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION	16
4.1 Délai de construction et liberté de conception architecturale	16
4.2 Impacts économiques	18
4.3 Impacts écologiques	20
4.4 Limitation des risques et des erreurs humaines sur chantier	22
5. DÉFIS LIÉS À L'ADOPTION DE L'IMPRESSION 3D DANS LA CONSTRUCTION	24
5.1 Investissement initial couteux	24
5.2 Construction partielle automatisée	25
5.3 Renforcement structural	26
5.4 Rendu de surface et reproductibilité	33
5.5 Conditions climatiques	34
5.6 Absence de codes et de règlements	35
6. MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION 3D	37
6.1 Compositions des mortiers imprimables	37
6.2 Caractéristiques recherchées pour le mélange imprimable	38
6.3 Caractérisation à l'état frais des mélanges imprimables	41
6.4 Performances mécaniques des pièces imprimées	43
7. LES MACHINES D'IMPRESSION AU SERVICE DE LA CONSTRUCTION 3D	45
8. EXEMPLES DE DOMAINES D'APPLICATION	50
8.1 Coffrages permanents	50
8.2 Applications non structurales	51
8.3 Applications structurales	55

9. CONFORMITÉ ET PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE DANS L'IMPRESSION 3D	59
9.1 Mise sur le marché et conformité	59
9.2 Brevets	60
10. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	62
BIBLIOGRAPHIE	64



# 1. Qu'est-ce que l'impression 3D ?

L'impression 3D, appelée aussi fabrication additive, désigne l'ensemble des procédés de création d'un objet par superposition de couches de matière avec une imprimante 3D. Ces machines fonctionnent selon le même principe de base. Un modèle numérique en trois dimensions (fichier 3D ou modèle 3D) est créé par un logiciel de conception. Ce modèle est découpé virtuellement par un logiciel de tranchage (*slicer*) en couches successives. Les indications alors transmises à l'imprimante permettent à la tête d'impression de se déplacer pour déposer la matière au bon endroit. La figure 1 résume les principales étapes de la fabrication additive.



**Fig. 1** Principe général de la fabrication additive [B15].

Le concept de fabrication additive industrielle regroupait en 2023 sept familles normalisées de procédés par superposition de couches (voir figure 2). À ce jour, ce concept ne comprend pas les technologies d'impression 3D du béton.

Matériau liquide	Matériau poudre	Matériau solide
1 – Projection de gouttes	3 – Projection de liant	6 – Extrusion de matière
MJM – Multi-Jet-Modeling	3DP – 3D Printing	FDM – Fused Deposition Modeling
2 – Polymérisation en cuve	4 – Fusion sur lit de poudre	7 – Stratification de couches
SLA – Stéréolithographie DLP – Digital Light Processing	SLM – Selective Laser Melting EBM – Election Beam Melting	LOM – Laminated Object Manufacturing
	5 – Dépôt de matière sous énergie concentrée	
	CLAD – Construction Laser Additive Directe LMD – Déposition Métallique par Laser	

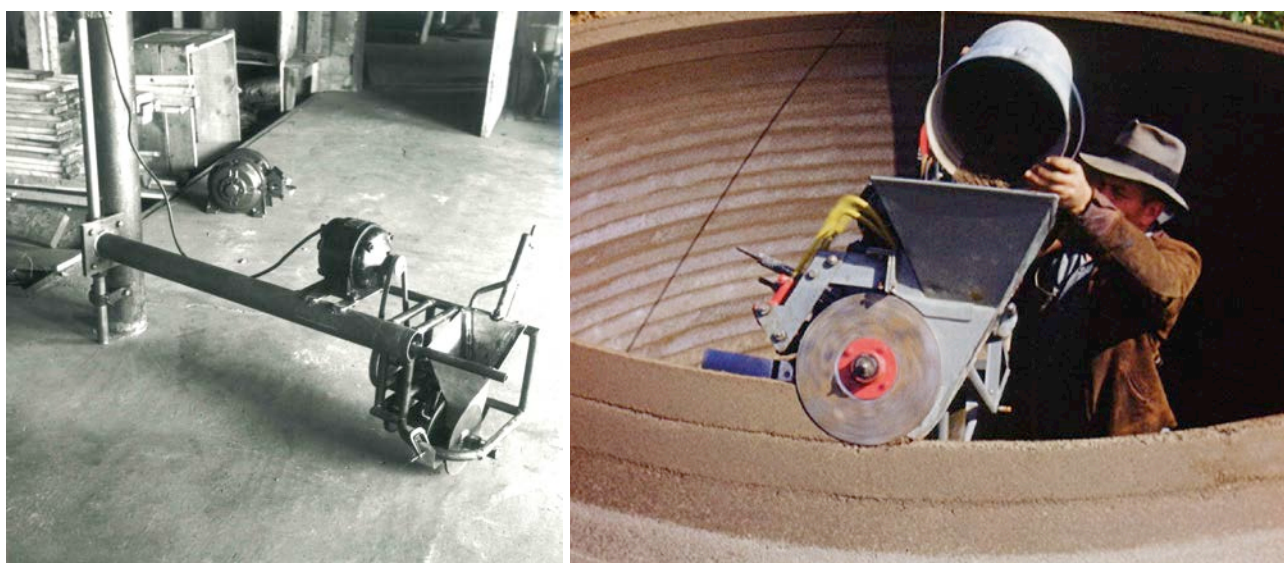
**Fig. 2** Les sept familles de procédés de fabrication additive définis dans la norme NBN EN ISO 17296-2 [B15].

Limitée pendant longtemps à des matériaux classiques tels que les plastiques, l'impression 3D couvre aujourd'hui un large spectre de matériaux : métaux, cires, fibres de carbone et, plus récemment, le mortier. Cette technique trouve de multiples applications dans des domaines variés : aéronautique, automobile, robotique, soins de santé, génie civil, etc. Ainsi, les pièces produites peuvent bénéficier de propriétés spécifiques aussi bien physiques (couleur, forme, etc.) que mécaniques (rigidité, résistance à la chaleur, etc.).

Le secteur de la construction recourt également à des termes alternatifs tels que fabrication additive à grande échelle (*Large Scale Additive Manufacturing (LSAM)*) ou construction libre (*Free Construction (FC)*).

## 2. Brève histoire de la construction par impression 3D

Tout d'abord, il est nécessaire de rappeler que, malgré l'enthousiasme récent du secteur, l'impression 3D ne date pas d'hier. En 1941, aux États-Unis, William E. Urschel avait déposé une demande de brevet pour sa *machine for building walls* qui permettait de construire des murs en béton sans coffrage. Cette machine était équipée d'une grande trémie dans laquelle on déversait du béton maigre à faible granulométrie (voir figure 3). Un rouleau rotatif, situé en dessous, alimentait et compactait le béton. La machine était soutenue par un mécanisme de godet qui pressait, à la manière d'une pelle, le coulis de béton provenant de l'orifice de la trémie contre le rouleau rotatif vers l'avant.



© Dave Tipold, Creative Solutions Manager, Urschel Laboratories, Inc.

Fig. 3 Prototype de la *machine for building walls* de William E. Urschel.

Bien qu'elle existait depuis des décennies dans l'industrie manufacturière, l'impression 3D ne s'est étendue au secteur de la construction qu'à la fin des années 1990. Les premières tentatives pour utiliser la technologie d'impression 3D dans la construction automatisée ont été menées au moyen de deux méthodes. La première consiste à utiliser la vapeur pour lier le matériau en couches de manière sélective. La machine dépose une fine couche de silice (sable) et, par-dessus, une couche de liant (ciment Portland). On projette ensuite de la vapeur pour durcir le liant et produire la forme désirée [P1]. La seconde méthode, le *Contour Crafting* (CC), a été développée à la *University of Southern California* (États-Unis) et a connu une popularité significative [K2]. Cette méthode d'extrusion recourt à des pâtes à base de ciment pour imprimer des pièces en 3D [K1]. Le système est constitué d'une grue et d'un portique commandé par ordinateur (voir figure 4, p. 9). Cette technique permet seulement d'imprimer le contour d'un élément, la cavité intérieure devant être remplie de béton fluide. L'objectif principal du *Contour Crafting* est d'éviter l'utilisation de coffrages conventionnels.

À partir des années 2000, l'évolution de l'impression 3D dans le secteur de la construction connaît une nouvelle croissance. Le *Freeform Construction Group* de l'université de Loughborough (Royaume-Uni), a été fondé afin d'adapter les techniques d'impression 3D existantes aux matériaux imprimables en mortier. Les premiers résultats ont mis en évidence qu'il était essentiel de parvenir à un seuil de rentabilité réaliste pour cette technologie. Par la suite, la même équipe a construit une machine d'impression 3D à grande échelle en combinant différents composants tels que le système de pompage, le béton projeté et le concept de portique. L'imprimante ainsi développée a permis de réaliser non seulement le contour, mais aussi des pièces entières. En parallèle, la technologie *D-Shape* a vu le jour en Italie (voir § 3.2, p. 13). Cette technologie de collage par des agents de liaison a été utilisée dans différents projets de construction. Les avancées ci-dessus marquent le début de l'adoption de cette technique dans le secteur.





Fig. 4 Processus du *Contour Crafting* (gauche) et principe de la construction à grande échelle avec ce procédé (droite) [K1].

Depuis 2010, l'impression 3D du béton a commencé à susciter l'intérêt des entreprises de construction et plusieurs projets autour de cette technique ont démarré partout dans le monde. Les dernières années ont été marquées par une certaine croissance grâce aux recherches menées sur cette thématique innovante. Depuis que le concept du mortier imprimé en 3D a été mis en avant, il y a plus de 20 ans, la recherche et les applications relatives à cette technologie se développent progressivement même si le nombre limité de projets concerne surtout des chantiers de démonstration liés à la recherche.

Aujourd'hui, l'impression 3D a atteint une certaine maturité vu les nombreuses imprimantes 3D de mortier disponibles sur le marché (voir chapitre 7, p. 45). Il est possible d'imprimer en usine et d'assembler les pièces imprimées sur chantier ou d'imprimer directement *in situ*. Bien que les technologies et matériaux existants offrent de nombreux avantages, ils comportent des défis et des limites. Du point de vue du marché, les entreprises semblent se faire concurrence pour automatiser au maximum le processus d'extrusion des matériaux afin de proposer la méthode de construction la plus pratique, la plus fiable ou même la moins chère. Par ailleurs, il convient encore de mieux cibler les applications pour lesquelles l'impression 3D du béton offre une réelle valeur ajoutée par rapport aux méthodes conventionnelles (voir chapitres 4, p. 16, et 8, p. 50, pour quelques exemples).

Le marché mondial de l'impression 3D du béton est segmenté en fonction de l'offre, de la technologie et des utilisateurs finaux. L'augmentation des investissements dans les activités de recherche et de développement et l'émergence de nouvelles technologies sont les principaux facteurs de croissance du marché. Les entreprises investissent dans la recherche et le développement de machines d'impression 3D plus perfectionnées et capables de fabriquer de grandes structures. La capacité du système d'impression à mettre en œuvre des conceptions plus sophistiquées et l'augmentation des activités de construction dans les économies émergentes, en particulier en Chine, favorisent partiellement la croissance du marché mondial de l'impression 3D du béton. Par ailleurs, l'essor rapide de l'urbanisation a fait bondir l'intérêt pour l'impression 3D dans la construction des maisons. Les acteurs du marché contribuent considérablement à sa croissance en adoptant diverses stratégies, notamment des partenariats, des collaborations, des financements et le lancement de nouveaux produits, afin de rester compétitifs. Toutefois, le coût élevé d'une certaine gamme d'imprimantes 3D, de leur maintenance, du logiciel d'exploitation ainsi que le manque de main-d'œuvre qualifiée sont des exemples de freins à la croissance du marché mondial de l'impression 3D du béton. La limitation des surfaces et des hauteurs d'impression est un autre inconvénient qui entrave aussi bien la croissance du marché que l'évolution de la technologie à l'échelle mondiale.

Géographiquement, le marché est segmenté en Amérique du Nord, en Europe et en Asie-Pacifique. Cette région devrait afficher la croissance la plus rapide sur le marché mondial de l'impression 3D du béton. En effet, l'intérêt grandissant du gouvernement et des organismes de réglementation pour les activités de construction écologique dans les économies émergentes (Inde et Chine) ainsi que pour l'industrialisation et l'urbanisation rapides font partie des principaux facteurs qui contribuent à la croissance du marché de l'impression 3D du béton dans cette partie du monde.

Le gain d'expérience progressif du secteur en matière de fabrication assistée par ordinateur et de modélisation des données du bâtiment (BIM) en particulier a facilité l'évolution de l'impression 3D. L'ensemble des tentatives et des projets de recherche menés sur l'impression 3D des structures en béton ont permis de relever de nombreux défis technologiques, de démontrer son potentiel particulier et de développer une solide expertise dans ce domaine. Afin d'imprimer du mortier en 3D, il faut un matériau adapté, un système d'impression 3D et des logiciels spécifiques. Ces différents aspects sont abordés dans la suite de ce document.

# 3. Procédés d'impression 3D dans le secteur de la construction

À ce jour, un certain nombre de procédés d'impression 3D ont pu être démontrés, notamment la fabrication sur site et hors site d'éléments de construction ou de bâtiments entiers, à l'aide de robots industriels et de systèmes à portique. Il est possible d'utiliser différents procédés d'impression 3D à l'échelle de la construction.

Les principaux sont :

- l'extrusion (voir § 3.1)
- la liaison ou le collage par poudre (voir § 3.2, p. 13)
- la soudure additive (voir § 3.3, p. 15).

L'extrusion est la technique la plus représentative de l'impression 3D du béton. La soudure additive, quant à elle, peut trouver son intérêt dans la fabrication des armatures.

Un procédé dit de coffrage glissant (*Slip forming* ou *Smart Dynamic Casting*) est parfois inclus dans la famille des procédés d'impression 3D du béton. Dans ce processus automatisé, un coffrage dynamique est continuellement déplacé et rempli de béton à une vitesse qui permet de façonner le matériau dans sa phase délicate de durcissement (pour la fabrication de colonnes, par exemple). Toutefois, et contrairement aux autres procédés d'impression 3D, le coffrage glissant est un procédé continu qui ne se base pas sur l'extrusion de couches. Il ne peut donc pas être classé parmi les procédés d'impression 3D par extrusion.

L'impression 3D du béton par extrusion en couches est la méthode la plus utilisée dans la construction sur site et recourt à des imprimantes 3D à grande échelle. Dans la suite du document (voir chapitre 4, p. 16), nous nous intéresserons plus particulièrement à cette technique d'impression 3D du béton par extrusion.

## 3.1 L'extrusion

Le **procédé d'extrusion** consiste à pomper à travers un tuyau un mélange préparé par malaxage et à l'envoyer vers une tête d'impression munie d'une buse à son extrémité (voir figure 5 gauche, p. 12). Après extrusion du matériau à travers la buse, des couches sont superposées sur une plateforme d'impression et forment ainsi l'objet final (voir figure 5 droite, p. 12). Les couches ont généralement une épaisseur comprise entre cinq millimètres et quelques centimètres. La tête d'impression se déplace dans différentes directions selon un modèle 3D. La surface finie (latérale) de la pièce imprimée par extrusion est relativement rugueuse en raison des tracés de couches visibles. La buse d'extrusion peut être équipée d'un outil de type truelle qui aplatit les couches imprimées en 3D et couvre les rainures aux interfaces entre les couches, ce qui permet d'obtenir une surface lisse (voir aussi § 5.4, p. 33). La qualité de l'objet imprimé dépend à la fois des caractéristiques rhéologiques<sup>(1)</sup> et thixotropiques<sup>(2)</sup> du matériau (ouvrabilité, consistance, etc.) et des paramètres préprogrammés de la machine (vitesse d'impression, débit, épaisseur de la couche, forme de la buse). À chaque étape de l'impression, le matériau doit présenter des propriétés particulières permettant, d'une part, son écoulement pendant le pompage et, d'autre part, sa stabilité après dépôt.

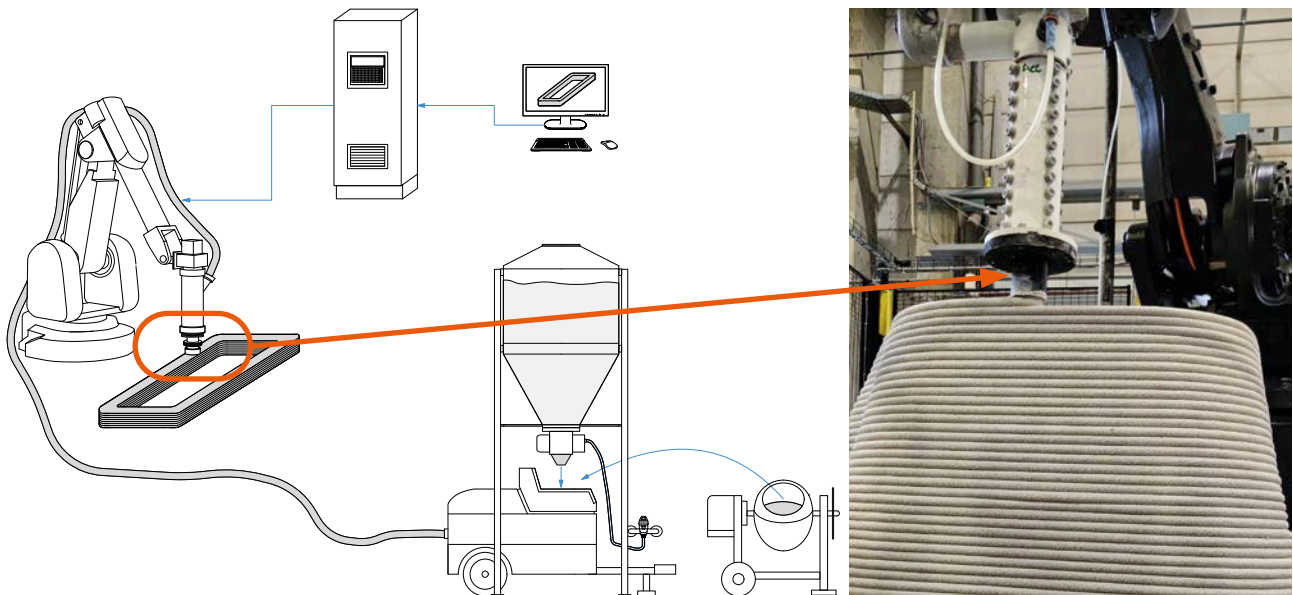
L'impression 3D par extrusion est l'approche la plus populaire dans la construction additive vu sa compatibilité avec une gamme étendue de matériaux de construction comme le mortier, l'argile, etc. Le gaspillage de matériau généré par ce procédé est considérablement limité si son **imprimabilité**<sup>(3)</sup> a été testée au préalable.

---

<sup>(1)</sup> La rhéologie est l'étude de l'écoulement (plasticité, élasticité, viscosité et fluidité) des matières déformables.

<sup>(2)</sup> La thixotropie se manifeste en particulier par une structuration (ou floculation) de la pâte de ciment lors d'un repos ou d'un écoulement lent du béton (augmentation du seuil d'écoulement).

<sup>(3)</sup> L'imprimabilité des matériaux cimentaires couvre trois aspects : la pompabilité (ouvrabilité), l'extrudabilité (capacité à être mis en œuvre par extrusion) et la constructibilité (empilement de couches stables).



**Fig. 5** Principe de l'impression 3D du béton par extrusion (gauche) et superposition des couches par extrusion (droite).

Il existe trois catégories classiques de machines d'impression 3D par extrusion (voir aussi chapitre 7, p. 45) :

- les machines à portique (système 'Gantry')
- les machines à leviers
- les machines à bras robotisé.

Les **machines à portique** sont constituées d'une tête d'impression attachée à un cadre mobile. Le portique se déplace le long de rails selon un système de coordination cartésien (axes x, y et z). Ce type d'imprimante est utilisé principalement pour des projets de grande ampleur (petite maison, p. ex.) en raison de sa taille, de sa portabilité limitée et surtout de la complexité du montage et du démontage. Elle permet d'imprimer des pièces en sections ou dans leur ensemble. Les **machines à leviers** disposent d'une tête d'impression suspendue à des leviers semblables à une grue. Ceux-ci se déplacent généralement sur six axes (six degrés de liberté), ce qui permet d'imprimer des formes plus complexes et d'obtenir un meilleur rendu de surface qu'avec le portique. Enfin, les **machines à bras robotisé** comportent une tête d'impression fixée à l'extrémité d'un bras robotisé se déplaçant sur six axes et imitant ainsi les mouvements d'un bras humain. Cependant, ces imprimantes restent plus chères que les machines à portique. Certaines entreprises, comme Twente Additive Manufacturing (TAM) aux Pays-Bas, ont combiné des systèmes à portique et à bras robotisé pour construire une imprimante à neuf axes (six axes standards et trois axes d'élévation et de retour du portique) (voir figure 6, p. 13).

Bien qu'elles présentent certaines similitudes, ces imprimantes se destinent à des applications spécifiques différentes et ont leurs forces et faiblesses propres, décrites dans le tableau 1. Le bras robotisé constitue la principale différence car il est généralement difficile à programmer et n'a qu'une portée limitée (surface imprimable limitée). Cela restreint son utilisation sur chantier et ne permet d'imprimer que des éléments

**Tableau 1** Comparaison entre les trois catégories de machines.

	Portique	Leviers	Bras robotisé
Emplacement privilégié	Sur site (chantier)	Sur site (chantier)	Hors site (préfabrication ou laboratoire)
Volume d'impression et applications	Impression d'un bâtiment entier sur site, productivité élevée	Impression de petites maisons, géométries complexes	Volume limité (portée du bras), possible d'augmenter l'espace de travail (robot sur rails, p. ex.). Impression d'éléments uniques, grande agilité, géométries complexes



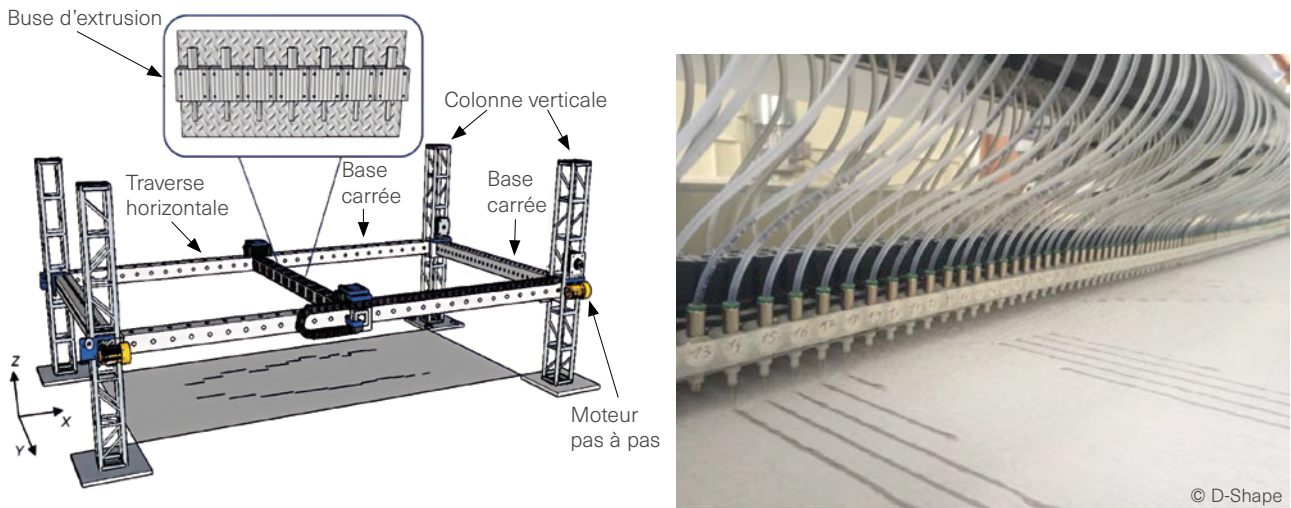
**Fig. 6** Machine à portique (A), machine à leviers (B), machine à bras robotisé à six axes (C) et imprimante à neuf axes avec robot placé sur un portique (D).

uniques mais plus complexes et détaillés sur le plan de la forme. En revanche, il offre l'avantage d'être plus mobile qu'une imprimante à portique grâce aux rails et aux roues. Son usage est plus adapté à la fabrication d'éléments en usine, éventuellement destinés à être assemblés avant leur pose sur site. La machine à portique couvre par contre de plus grandes distances et permet de réaliser sur chantier des impressions d'un volume plus élevé telles que des maisons de faible superficie.

La gamme de machines d'impression 3D par extrusion disponibles sur le marché est détaillée au chapitre 7 (p. 45).

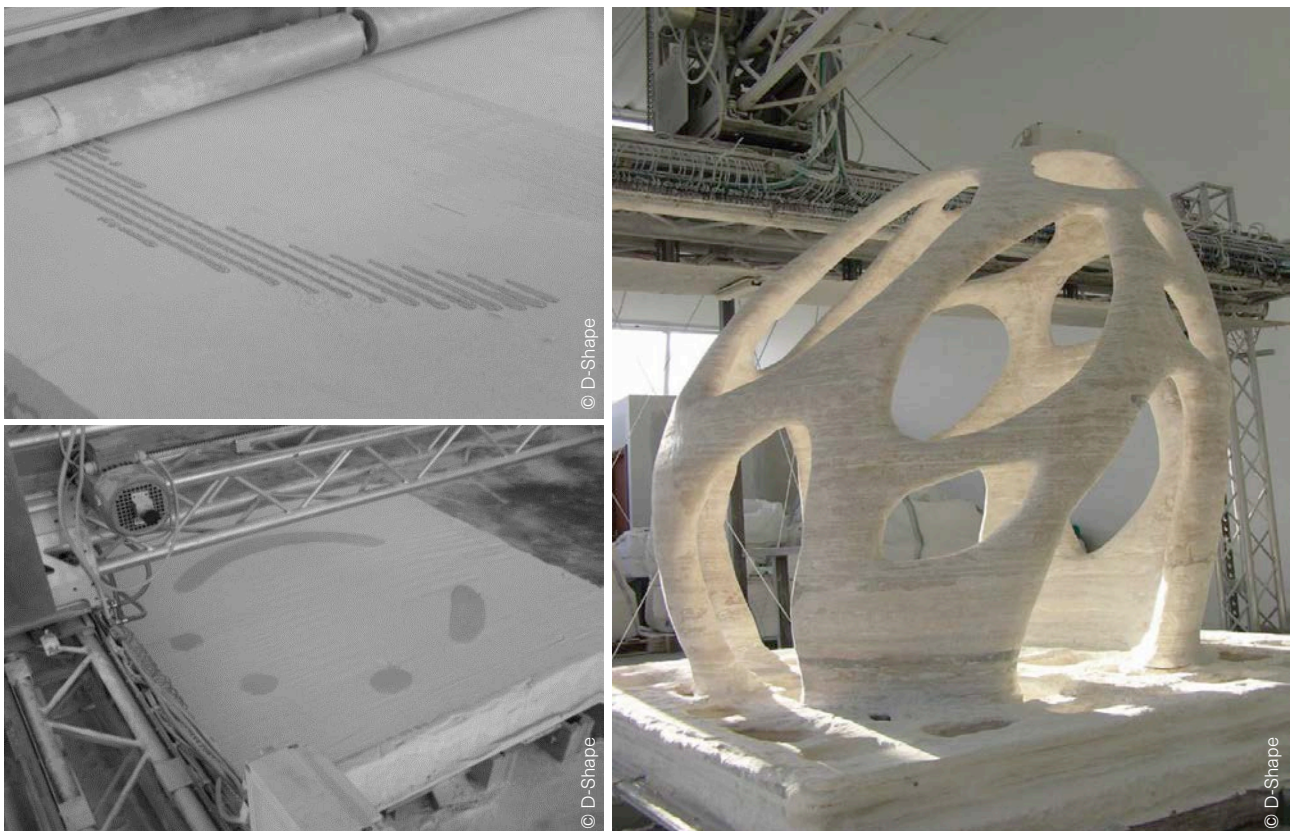
## 3.2 La liaison ou le collage par poudre

En Europe, l'ingénieur italien Enrico Dini a dévoilé un procédé issu du développement d'une imprimante 3D à portique en forme d'un cube de quatre mètres de côté, baptisée *D-Shape*. Le cadre se compose d'une base carrée qui se déplace verticalement le long de quatre colonnes (voir figure 7 gauche, p. 14).



**Fig. 7** Procédé d'impression 3D par collage de poudre avec une imprimante D-Shape (gauche) et tête d'impression composée d'une multitude de buses (droite).

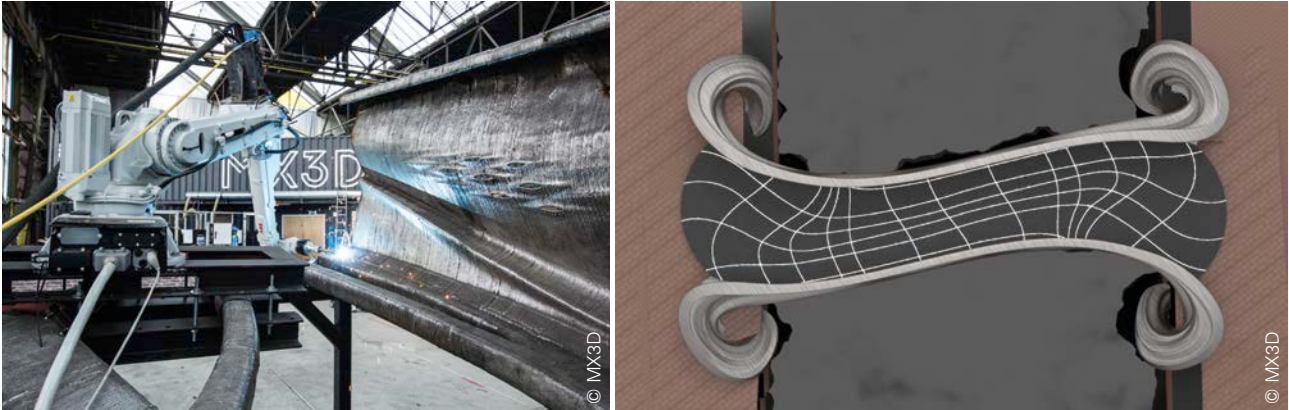
Le principe de la technique D-Shape repose sur deux actions. L'imprimante étale d'abord une couche de sable de l'épaisseur souhaitée et, afin de durcir le matériau, elle injecte localement des gouttelettes de liant *Ink Binder* grâce à une tête d'impression composée de centaines de petites buses (voir figure 7 droite). Ces deux opérations sont répétées pour chaque couche. Une fois l'impression terminée, l'excès de sable (non lié) est enlevé pour dévoiler la structure imprimée. À l'origine, cette technique a été développée pour fonctionner avec un système de liaison de type résine époxy. Elle a été ensuite adaptée afin d'utiliser des agents de liaison inorganiques et d'imprimer ainsi des volumes plus importants. La figure 8 présente le Pavillon Radiolaria imprimé en 2007 avec la technique D-Shape au moyen d'une imprimante industrielle de six mètres de côté.



**Fig. 8** Pavillon Radiolaria construit avec la technique D-Shape.

## 3.3 La soudure additive

La **soudure additive**, également connue sous le nom de WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) et essentiellement destinée aux éléments métalliques, utilise du fil de soudure comme métal d'apport. Ce procédé est basé sur le soudage à l'arc et produit également des pièces métalliques en superposant des cordons de soudure couche par couche. Bien que l'impression 3D par soudure additive soit limitée aux structures métalliques, elle permettrait de réaliser des structures complexes et solides. L'exemple d'un pont en acier inoxydable imprimé en 3D à Amsterdam par la société néerlandaise MX3D est illustré à la figure 9. Cette technique est également utilisée, à moindre échelle, pour imprimer les armatures d'éléments en béton.



**Fig. 9** Étapes d'impression en 3D d'un pont en acier au moyen d'un procédé de soudure additive.

# 4. Potentiel de l'impression 3D dans le secteur de la construction

Plusieurs projets d'impression 3D par extrusion ont démontré les avantages de ce procédé par rapport aux méthodes de construction traditionnelles. Les échanges avec le secteur montrent que les actions de Buildwise facilitent l'adoption de l'automatisation et de la robotique de sorte que les entreprises bénéficient des gains potentiels générés par ces technologies. Certains architectes s'intéressent fortement à ce nouveau procédé de construction. En effet, l'impression 3D ouvre de nouvelles perspectives et permet de créer des formes complexes, voire impossibles à réaliser avec les méthodes traditionnelles.

L'impression 3D offre une série d'avantages dont les plus notables sont :

- le délai de construction
- la création de formes complexes
- la réduction potentielle des coûts et des déchets
- la diminution de la pénibilité, des accidents du travail et des erreurs humaines.

## 4.1 Délai de construction et liberté de conception architecturale

Le célèbre adage 'Le temps, c'est de l'argent' est un argument souvent avancé sur chantier puisque la rapidité de la construction présente un intérêt évident pour les entrepreneurs. Dans le contexte de l'impression 3D, plusieurs facteurs raccourcissent les délais de construction : utilisation de mortier à prise rapide qui ne nécessite aucun coffrage, impression continue et réalisation des travaux auxiliaires pendant le processus d'impression. Les méthodes de construction traditionnelles requièrent un délai de quelques jours avant de procéder au décoffrage des éléments en béton. Faire abstraction du coffrage permet de gagner du temps et de réduire les coûts y afférents qui, selon la complexité du projet, représentent la plupart du temps 25 à 75 % du coût total de l'ouvrage en béton. En outre, l'imprimante 3D permet de construire des pièces de manière continue et réduit ainsi les temps d'attente même si la vitesse d'impression (vitesse de déplacement de la tête d'impression) varie en fonction de la machine (voir chapitre 7, p. 45). Les délais de construction sont également réduits grâce aux travaux auxiliaires réalisés pendant l'impression tels que la pose et l'isolation des gaines, le placement des blochets électriques, etc. En temps normal, ces travaux n'interviennent qu'après le gros œuvre. L'impression 3D permet ainsi d'épargner du temps et même davantage si l'on compare ce procédé à la méthode traditionnelle plutôt qu'à la préfabrication en usine.

De nombreuses démonstrations concrètes dans différents pays ont confirmé la rapidité de réalisation grâce à des imprimantes 3D. Par exemple, une maison à deux étages de 90 m<sup>2</sup> a été construite chez Kamp C (Belgique) en trois semaines par l'intermédiaire de l'impression 3D (voir figure 10, p. 17). Toutefois, ce projet n'a pour l'instant qu'une vocation de prototype. Certains articles de presse font mention de maisons construites en seulement 24 heures, mais ce délai n'est pas toujours représentatif de la réalité et ne prend généralement pas en compte les fondations, les menuiseries extérieures, les travaux de plomberie, etc.

Avec les méthodes de construction traditionnelles, le choix d'un coffrage dépend entre autres de l'ouvrage et son usage, de la complexité de la forme à réaliser et du degré de réemploi. Il faut éviter autant que possible de donner au béton des formes qui nécessitent des coffrages complexes, onéreux et non réutilisables. De tels coffrages personnalisés sont parfois loin d'être rentables pour l'industrie. Pourtant, les architectes ont actuellement tendance à donner des formes imprévues au béton car ils veulent offrir des effets perceptifs aux structures. Ceci entraîne toutefois d'importantes difficultés de réalisation. Face à ce problème, des initiatives telles que l'utilisation des coffrages en matière textile ont été menées pour obtenir des pièces en béton de formes complexes. Bien qu'ils offrent de nombreuses perspectives architecturales, les formes réalisables demeurent limitées. Grâce à l'impression 3D, il est aujourd'hui possible de réaliser des pièces complexes sans recourir aux coffrages. C'est un énorme avantage pour les concepteurs et les architectes qui souhaitent





**Fig. 10** Maison de deux étages imprimée chez Kamp C à Westerlo.

intégrer à leurs projets des géométries innovantes inhabituelles comme des formes organiques. À titre d'illustration, un poteau de forme complexe est présenté à la figure 11. Ce poteau de quatre mètres de haut a été imprimé par la société française XtreeE afin de soutenir le nouvel auvent d'un petit ensemble tertiaire à Aix-en-Provence (France). Pour réaliser le poteau, un coffrage permanent a été imprimé en 3D avant d'être rempli d'un béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP).

L'impression 3D de pièces (creuses) de mobilier urbain peut remplacer le procédé de production par moulage. L'entreprise belge Urbastyle, spécialisée dans ce domaine, a lancé sa nouvelle gamme de bancs imprimés en 3D (voir figure 12). Par conséquent, l'impression 3D du béton permet de gagner du temps non seulement pour la construction de maisons, mais aussi pour la fabrication de tout élément non linéaire.



© Métropole d'Aix Marseille, Territoire du Pays d'Aix, Marc Dalibard, EZCT Architecture & Design Research (Philippe Morel et Felix Agid), XtreeE, Artelia, Fehr Architectural, LafargeHolcim, AD Concept, Lisa Ricciotti.

**Fig. 11** Poteau imprimé en 3D par XtreeE.



**Fig. 12** Banc partiellement imprimé par Urbastyle.

## 4.2 Impacts économiques

Dans certains cas, l'impression 3D offre le potentiel d'une construction moins coûteuse par rapport aux méthodes traditionnelles. La réduction des coûts comprend la suppression des coûts de coffrage ainsi que ceux du transport entre le centre de production et le centre logistique si l'impression se fait sur site (impression à l'échelle d'une maison, p. ex.), la moindre quantité de matériau utilisé grâce à la conception optimisée (voir § 4.3, p. 20), et la réduction des besoins en main-d'œuvre. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui reposent sur des coffrages et requièrent plus de main-d'œuvre, l'impression 3D n'utilise aucun coffrage, ce qui permet d'économiser de la main-d'œuvre et de réduire le coût des matériaux utilisés. En revanche, le coût de l'investissement initial demeure élevé (voir § 5.1, p. 24).

Dans la presse, une incohérence a été identifiée au niveau des coûts de construction des maisons par l'impression 3D. Vu que les maisons construites avec ce procédé sont encore en phase expérimentale, il est difficile d'obtenir des données chiffrées probantes sur le coût total d'une maison imprimée. Celui-ci varie selon les matières premières utilisées, la complexité du design, le délai d'impression, le pays, voire la région où se situe le projet, le type d'imprimante, etc. Un certain nombre de projets de maisons imprimées ont été examinés pour estimer leur coût moyen. Dans certains cas, le prix annoncé exclut le coût des fondations, la toiture, les finitions intérieures et extérieures, l'isolation des murs, les menuiseries extérieures, le faux-plafond ou le sol de la maison.

La maison imprimée en 3D aux États-Unis par la société SQ4D aurait été vendue à la moitié du prix des nouvelles maisons construites par les méthodes traditionnelles dans la même région (voir figure 13). Toute l'ossature de la maison ainsi qu'une partie du mobilier ont été imprimés en 3D.

Dans le quartier de Meerhoven à Eindhoven (Pays-Bas), le projet Milestone, porté par la municipalité et différents partenaires académiques et industriels, est un projet de logements sociaux regroupant cinq maisons de différentes formes et destinées à être construites par impression 3D (voir figure 14).



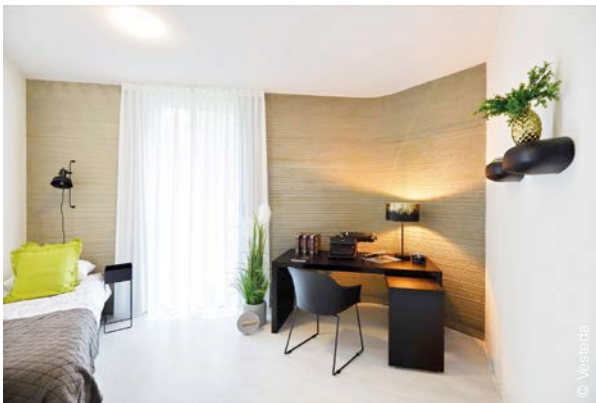
Fig. 13 Maison imprimée par SQ4D.

Fig. 14 Les cinq maisons du projet Milestone.



D'une superficie de 95 m<sup>2</sup>, la première maison (la plus simple) est déjà construite et mise en location depuis avril 2021 (voir figure 15). Les murs ont été imprimés à l'Université de technologie d'Eindhoven (Pays-Bas) avec un béton recyclé, puis assemblés et posés sur les fondations. La toiture, la charpente et les finitions ont été ensuite mises en œuvre. Le cout total de la construction n'a pas encore été communiqué.

De son côté, la société italienne WASP (*World's Advanced Saving Project*) a imprimé une maison écologique, appelée Gaïa, en utilisant des matériaux locaux et la nouvelle technologie *Crane WASP* (voir aussi § 4.3, p. 20), ce qui a permis de réduire considérablement les couts de construction (voir figure 16, p. 20). L'impression a duré dix jours et le cout total des matières premières utilisées pour les murs s'élèverait à 900 €.



**Fig. 15** Maison imprimée et louée dans le cadre du projet Milestone.



Fig. 16 Maison Gaïa imprimée par la Crane WASP.

En fin de compte, ces différents scénarios montrent que la technique d'impression 3D n'en est encore qu'à ses balbutiements, ce qui explique que le cout pour imprimer une pièce en 3D est encore assez élevé. Malgré plusieurs prototypes, peu de maisons construites au moyen de l'impression 3D existent actuellement sur le marché. Il semble toujours difficile de comparer les prix des maisons imprimées à ceux des maisons construites par les méthodes traditionnelles. En effet, la majorité des maisons imprimées en 3D à ce jour ne le sont pas avec du béton, tel que défini dans la norme NBN EN 206 [B14], mais bien avec des mortiers (granulats d'une taille maximale d'environ quatre millimètres) à forte teneur en ciment (généralement de 500 à 800 kg/m<sup>3</sup>). Jusqu'à présent, aucun projet d'impression 3D n'a été réalisé avec du béton ordinaire. Ce matériau permettrait de réaliser des économies substantielles par rapport aux mortiers prêts à l'emploi. Le manque de réglementation et de normes pour les maisons imprimées en 3D freine aussi l'adoption de ce procédé dans le secteur. Toutefois, vu le nombre croissant d'entreprises qui sautent le pas de l'impression 3D et l'industrialisation à grande échelle du procédé, les prix pourraient venir à baisser.

## 4.3 Impacts écologiques

Le béton est le matériau manufacturé le plus consommé au monde. Il est donc indispensable de l'utiliser de la manière la plus adaptée en fonction des besoins. La quantité exacte de matériau nécessaire à la conception d'une pièce complexe pourrait être mieux estimée et maîtrisée avec l'impression 3D. En préfabrication classique, une optimisation des formes est également possible, mais elle nécessite la production de coffrages complexes. Elle pourrait se traduire par une économie de matière qui consiste à répartir le matériau de façon idéale dans un volume pour générer moins de déchets. Cet avantage est renforcé par une méthode numérique appelée **optimisation topologique**. Cette méthode fait appel à un logiciel d'optimisation qui identifie les zones à faibles et fortes contraintes en créant un modèle 3D sur lequel des charges sont appliquées. L'utilisateur peut alors sélectionner les parties indispensables et supprimer celles qui sont inutiles afin d'économiser la quantité de matériau à utiliser. Pour les formes organiques et complexes, l'optimisation topologique peut avoir des répercussions significatives sur le cout de la pièce et le temps de production. Elle permet ainsi d'imprimer des formes optimisées avec une maîtrise géométrique accrue tout en limitant la quantité de matière.

Des exemples d'impression 3D ont été médiatisés pour mettre en évidence le potentiel de l'optimisation topologique dans la construction 3D : le poteau imprimé par XtreeE (voir figure 11, p. 17) et la passerelle piétonne imprimée par l'entreprise néerlandaise Vertico en collaboration avec l'Université de Gand (voir figure 17, p. 21), par exemple. Dans ce dernier cas, les deux partenaires ont conçu la passerelle en utilisant l'optimisation topologique pour supprimer la matière inutile. Pour ces deux ouvrages, les concepteurs ont imprimé en 3D un coffrage permanent, rempli avec un béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) (poteau) ou un béton autoplacant<sup>(4)</sup> (BAP) (passerelle).

Bien que l'impression 3D du béton soit une technologie souvent qualifiée d'économique, il importe de souligner la perte de matière générée lors de la détermination des paramètres d'impression optimaux (débit

<sup>(4)</sup> Béton ultrafluide qui se met en place sous le seul effet de la gravité, sans compactage.



**Fig. 17** Résultats de l'optimisation topologique sur une poutre à travée unique soumise à une charge uniforme (haut [O1]) et impression 3D de la passerelle optimisée (bas).

d'écoulement, vitesse d'impression, délai d'attente entre les couches), surtout dans la phase de prise en main de la machine. Ces paramètres dépendent principalement des caractéristiques rhéologiques des matériaux et du volume de l'élément à imprimer.

Il est possible de réduire l'impact environnemental en utilisant une moindre quantité de matériaux, mais aussi en recourant à des matériaux écologiques. Selon la GCCA (*Global Cement and Concrete Association*), la fabrication du ciment, matériau le plus utilisé dans la construction, est très polluante et représente environ 7 % des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. La plupart des impressions 3D font appel à des mortiers riches en ciment (Portland) qui possède une plus forte empreinte carbone qu'un béton ordinaire. En effet, une grande quantité de ciment à prise rapide est nécessaire pour pouvoir superposer les couches (voir § 6.1, p. 37). Réduire la quantité de ciment Portland dans les mélanges imprimables constitue la priorité actuelle pour rendre la construction 3D plus écologique. Des initiatives visant à développer des mélanges imprimables préparés à partir de matières premières locales ou même de sous-produits industriels sont menées pour diminuer l'impact environnemental de l'impression 3D, sans amoindrir la qualité des pièces imprimées.

L'empreinte carbone du ciment à prise rapide, couramment utilisé pour l'impression 3D, peut ainsi être réduite par l'usage de liants alternatifs respectueux de l'environnement tels que les liants alcali-activés ou d'autres sous-produits industriels cimentaires. À titre d'exemple, la startup Renca, inscrite au programme de collaboration *Dubai Future Accelerators*, a commercialisé le *Geopolymer 3D ink*, un matériau d'impression 3D fabriqué à partir de résidus industriels. Il importe de noter que les géopolymères et autres matériaux alcali-activés constituent un groupe très diversifié de liants dont les indicateurs d'impact environnemental sont assez variables.

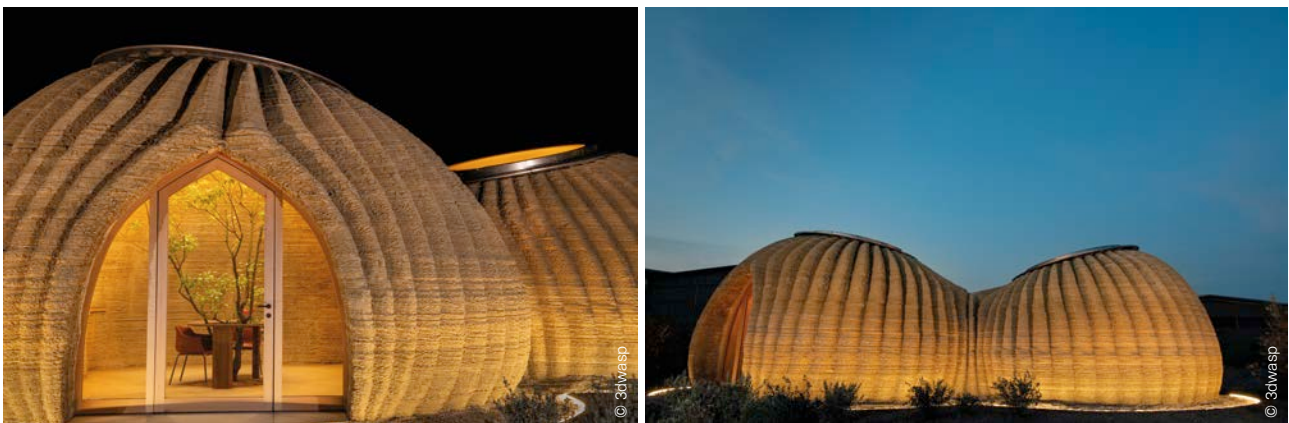
Par ailleurs, des initiatives tournées vers une construction additive, écologique et recyclable ont été lancées afin de faire face aux pénuries de ressources naturelles. Ainsi, dans le cadre du projet européen CIRMAP, des recherches sont menées par plusieurs partenaires, dont l'Université de Liège, pour valoriser le sable recyclé, issu des bâtiments démolis, en l'intégrant dans des formulations de mortier imprimable (voir figure 18, p. 22). CIRMAP s'inscrit dans la continuité de projets de recherche coopérative, en particulier les projets SeRaMCo (Interreg North-West Europe) et MATRICE (FEDER, Hauts de France).

L'impression 3D ouvre dès lors de nouvelles pistes pour l'utilisation de matériaux naturels locaux. Dans le cadre du projet d'éco-logements TECLA mené par le cabinet d'architecture Mario Cucinella Architects et l'entreprise italienne WASP, des structures (habitations unifamiliales, p. ex.) en forme de dôme ont été imprimées à partir de matériaux locaux, peu coûteux et recyclés (voir figure 19, p. 22). L'objectif de WASP est de bâtir des logements durables grâce à la fabrication additive. Pour ce faire, la firme italienne a développé une imprimante particulière, la *Crane WASP*, qui fonctionne à l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique. Ainsi, les régions davantage touchées par le manque d'électricité pourraient construire des structures respectueuses

de l'environnement avec des matières premières locales. Ce projet, comme de nombreux autres, montre que la technique se prête bien à l'usage de matériaux alternatifs (argile, p. ex.), qui sont disponibles en abondance sur le lieu d'impression (voir § 6.1, p. 37).



**Fig. 18** Impression d'un mortier à base de sable recyclé belge fourni par le centre de recyclage des déchets inertes RECYMEX (essai effectué chez Buildwise en collaboration avec l'ULiège).



**Fig. 19** Dômes imprimés à partir de terre crue dans le cadre du projet TECLA.

## 4.4 Limitation des risques et des erreurs humaines sur chantier

La construction est l'un des secteurs d'activités présentant le plus de risques. Le travail sur chantier est reconnu pour la pénibilité des tâches qui y sont accomplies et les accidents du travail qui s'y produisent. Les conditions de travail et la prévention des risques ont occupé une place centrale dans les études et les interventions en ergonomie conduites sur les chantiers du secteur de la construction et des travaux publics. En 2021, le secteur belge de la construction dénombrait plus de 8300 accidents du travail ayant entraîné au moins un jour d'incapacité.

La réduction des interventions humaines et du temps passé sur chantier grâce à la construction programmée et automatisée permet de diminuer la pénibilité et les risques au travail. Bien que les interventions humaines soient requises, d'une part, pour installer, alimenter, piloter et programmer la machine et, d'autre part, pour surveiller le déroulement des différentes étapes d'impression, le processus d'impression 3D est entièrement automatisé et la majeure partie des opérations ne nécessitent aucune intervention humaine. L'automatisation de la construction des structures en béton devrait permettre de limiter le nombre de travailleurs et la pénibilité

des tâches, que ce soit pour imprimer en 3D ou porter des charges lourdes. Des informations numériques standardisées, rigoureuses et complètes sur le bâtiment sont requises pour la construction automatisée. Par conséquent, l'impression 3D est plus précise et les erreurs humaines sont fortement limitées.

Cependant, des craintes ont été exprimées, notamment au sujet du remplacement des travailleurs de métiers qualifiés de la construction par des robots et des pertes massives d'emplois qui en découleraient. Les robots devraient être principalement utilisés pour réaliser des tâches dangereuses et pénibles, comme c'est le cas pour l'impression 3D par extrusion. Il va sans dire que la construction 3D mènera à la création de nouvelles fonctions vu les compétences spécifiques requises pour piloter, programmer et entretenir les imprimantes 3D. Il ne s'agit donc pas de remplacer les travailleurs qualifiés mais plutôt de les réorienter en fonction des compétences requises. Le système d'impression (malaxage, pompage et impression par le robot) doit être supervisé et encadré pour s'assurer du bon déroulement des tâches et du bon comportement du matériau. Les nouveaux postes permettront ainsi aux travailleurs de la construction d'accroître leurs compétences et aux entreprises de construction de diversifier leurs activités.

En résumé, il s'avère aujourd'hui possible d'imprimer des (petites) maisons, des pièces de mobilier urbain ou des passerelles. Un des grands avantages de l'impression 3D est la liberté de design. Grâce à ce procédé, les formes complexes qui ne peuvent être mises en œuvre avec les méthodes traditionnelles deviennent accessibles. Une bonne maîtrise de la technique d'impression 3D et de l'optimisation topologique devrait permettre de réduire les déchets, la consommation de matériaux et les coûts de construction. Le recours à l'impression 3D pourrait également réduire les risques d'accident du travail. À ce jour, la majorité des projets d'impression sont réalisés avec du mortier à forte teneur en ciment Portland. Cette teneur en ciment à prise rapide augmente non seulement l'empreinte carbone des mélanges imprimables, mais favorise aussi l'apparition de fissures dues au retrait qui peuvent affecter les performances de durabilité des pièces imprimées. L'utilisation d'autres matériaux plus durables, fabriqués à partir de déchets industriels ou de béton recyclé, est une priorité pour les mélanges imprimables. Malgré les nombreux avantages de l'impression 3D, ce procédé de construction représente encore un véritable défi pour le secteur et suscite de nombreuses interrogations.

# 5. Défis liés à l'adoption de l'impression 3D dans la construction

Motivé par la flexibilité qu'offre cette technique par rapport aux méthodes conventionnelles, le secteur de la construction adopte de plus en plus l'impression 3D. Toutefois, certains obstacles et défis freinent ce choix. L'investissement initial, l'installation sur chantier, le développement des mélanges imprimables (voir chapitre 6, p. 37), le renforcement structural, le rendu de surface, les conditions climatiques et l'absence de codes et de règlements, en constituent quelques exemples.

## 5.1 Investissement initial coûteux

Bien que l'impression 3D permet d'économiser sur les coûts de fabrication de certains éléments, elle nécessite avant tout un investissement important, en particulier dans les machines, les consommables, les logiciels et, parfois, le post-traitement. Parmi les différents facteurs qui affectent le coût de la construction 3D, l'imprimante représente l'investissement initial le plus significatif. Ce dernier peut être rentabilisé à moyen terme, mais il reste une dépense importante à assumer. Dans le cas de l'impression 3D, le calcul de rentabilité doit encore être affiné en fonction de facteurs tels que la quantité de matière et la plus-value esthétique. Le marché visé entre aussi en ligne de compte car l'impression 3D n'est pas encore déployée pour imprimer des bâtiments de plusieurs étages. Elle constitue toutefois un choix intéressant par rapport aux méthodes traditionnelles dans des applications de niche telles que la réalisation d'éléments caractérisés par une forme complexe.

La fourchette de prix des imprimantes reste très variable en fonction de facteurs tels que le volume d'impression, la précision, les performances, etc. Le prix d'une imprimante à grande échelle commence généralement aux alentours de 75 000 € et peut atteindre plusieurs millions d'euros (pour la gamme de machines disponibles sur le marché, voir chapitre 7, p. 45). De plus, le prix d'une imprimante est affecté par sa compatibilité avec les matériaux. En effet, certaines machines ne sont compatibles qu'avec des matériaux comportant des propriétés spécifiques et développés par le fabricant de l'imprimante. Cette dernière ne représente pas le seul coût en ce qui concerne les machines. Le système d'impression nécessite également un malaxeur et une pompe pour délivrer les matériaux à la machine d'impression, ce qui peut revenir à quelques dizaines de milliers d'euros. La maintenance de toutes les machines constitue également un coût pouvant atteindre plusieurs (dizaines de) milliers d'euros par an. Le recrutement, la formation au logiciel et la rémunération des opérateurs de production spécialisés constituent d'autres exemples de frais qui font grimper la facture initiale.

Toute pièce imprimée en 3D trouve son origine dans un modèle créé par un logiciel de modélisation. Les entrepreneurs novices peuvent employer de nombreux logiciels gratuits, y compris les logiciels libres, qui sont constamment mis à jour et améliorés (modélisation 3D et tranchage (*slicer*), voir chapitre 1, p. 7). Avant tout achat d'une imprimante, il est vivement recommandé de vérifier les fichiers compatibles avec chaque machine d'impression. Le choix du logiciel dépend ainsi de la complexité de la pièce à imprimer. De plus, il existe des plateformes où de nombreux modèles déjà développés peuvent être téléchargés gratuitement. Après l'installation d'un modèle, un logiciel de tranchage sera nécessaire pour lancer l'impression. Chaque logiciel de modélisation et de tranchage a ses particularités et ses spécificités. Les logiciels payants offrent généralement des fonctionnalités complémentaires telles que des réglages précis pour les extrudeurs et des simulations de préimpression afin de déterminer les points faibles qui pourraient causer l'échec du processus. Si l'utilisateur opte pour des logiciels payants, les abonnements annuels peuvent se chiffrer à plusieurs milliers d'euros. D'autres logiciels facultatifs peuvent être utilisés comme des logiciels d'optimisation topologique qui permettent d'économiser les matériaux (voir § 4.3, p. 20) et des logiciels d'automatisation des flux de travail qui permettent d'acheminer les informations et de mener à bien les actions dans un délai imparti. Le prix de ces logiciels est particulièrement élevé.

Outre les machines, les matériaux de construction 3D font également grimper les coûts, surtout s'il s'agit de mélanges imprimables à base de ciment Portland. Des mélanges prêts à imprimer existent sur le marché tels que ceux proposés par Weber, Vicat, Sika et Cantillana. Bien qu'ils soient généralement plus chers que



les mélanges développés à partir de matières premières locales, ils permettent en principe de garantir que le mélange est compatible avec la plupart des machines et qu'il offre aux pièces imprimées les propriétés mécaniques souhaitées.

Le prix d'un système d'impression et la maîtrise technique nécessaire à sa mise en œuvre peuvent limiter son utilisation dans le secteur de la construction. Cependant, la construction 3D pourrait présenter une forte valeur ajoutée, ce qui justifie le coût de l'investissement initial par rapport aux méthodes de construction traditionnelles.

## 5.2 Construction partielle automatisée

Bien que les imprimantes 3D permettent de réduire le délai et la consommation de matériaux, elles ne peuvent imprimer que des logements de faible superficie. De plus, les machines ne sont pas encore capables d'imprimer l'ensemble des éléments d'une maison. La technologie n'offre ainsi qu'une réponse partielle à l'automatisation de la filière, car l'impression 3D se limite le plus souvent au gros œuvre et inclut parfois une partie de l'isolation et du mobilier. Les autres éléments tels que la toiture, les finitions (revêtements de sol, peinture, etc.), les menuiseries intérieures et extérieures, la plomberie, l'électricité ou les barres d'armature sont installés séparément, soit en interrompant le processus d'impression, soit après l'impression du gros œuvre. Plusieurs éléments peuvent être envisagés durant la conception pour faciliter certaines techniques. Par exemple, un mur creux imprimé nécessite moins de matériaux et permet d'incorporer l'isolation et les canalisations d'eau. En outre, la tête d'impression peut être personnalisée pour armer automatiquement le béton (voir aussi § 5.3.1, p. 26).

À terme, les chercheurs et concepteurs espèrent étendre l'impression 3D à d'autres éléments de construction même si des recherches et des développements seront encore nécessaires.

Dans le cadre de son évolution, la société française ERB a développé un concept de maison qui est avant tout une innovation collaborative menée par plus de 20 partenaires (PME et startups de la région des Pays de la Loire, en France) désireux d'utiliser la numérisation à toutes les étapes du processus de construction (de la réalité augmentée à la construction par impression 3D). L'ensemble des techniques et des matériaux a été sélectionné sur la base d'un cahier des charges très précis réunissant des paramètres tant d'économie circulaire que de performance énergétique et environnementale. Au lieu d'insérer une isolation dans une pièce imprimée en mortier, on imprime en 3D deux parois en mousse de polyuréthane recyclé entre lesquelles on coule du béton au fur et à mesure de l'impression. L'idée est d'obtenir des coffrages permanents isolants. La mousse sert ainsi de moule et d'isolation thermique par l'intérieur et par l'extérieur. Cette méthode a permis d'imprimer une maison individuelle appelée 'Empreinte' à Beaucouzé (France) (voir figure 20).



**Fig. 20** Deux parois en mousse de polyuréthane imprimées en 3D entre lesquelles du béton est coulé (gauche) et maison 'Empreinte' (droite).

La société suédoise BLB Industries a développé une machine capable d'imprimer des portes et des montants de fenêtre d'une hauteur de 2,5 mètres et d'une largeur de 1,5 mètre à partir de granulés en matériaux polymères ou en résine. Ce projet et les autres initiatives constituent des jalons importants vers l'automatisation plus généralisée du processus de construction.

## 5.3 Renforcement structural

Vu que le placement des armatures ne s'intègre pas aisément au procédé d'impression 3D, les formes en voute sont privilégiées pour limiter les sollicitations en traction. En effet, si le béton non armé peut supporter des charges importantes en compression, il est beaucoup plus faible lorsqu'il est soumis à des efforts de traction (tensions ou flexions). À ce jour, il n'est pas possible d'imprimer des éléments en porte-à-faux comme un plancher. C'est pourquoi l'impression 3D est limitée à de petites structures comme des pavillons ou des murs.

Pour une adoption plus large de l'impression 3D dans la pratique, il conviendra de renforcer la pièce imprimée pour améliorer sa résistance à la traction et lui conférer des propriétés mécaniques adéquates. Au contraire des méthodes de renforcement traditionnelles (béton coulé dans et autour de cages d'armature en acier, p. ex.), le renforcement du mortier imprimé en 3D nécessite une technique flexible de haute contrôlabilité.

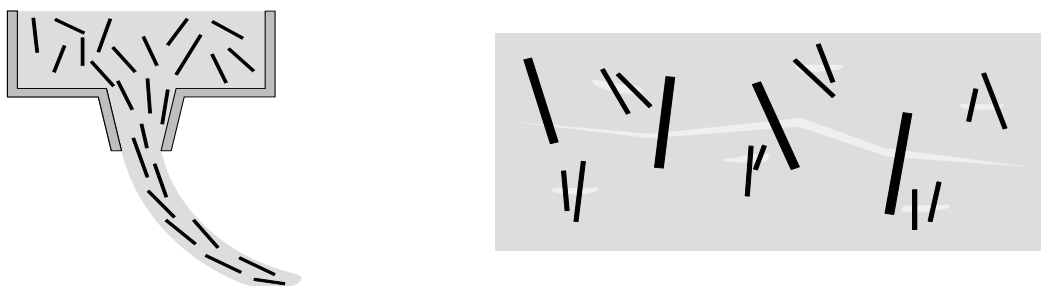
Les recherches récentes se sont orientées vers l'amélioration des performances structurales des pièces imprimées. Plusieurs stratégies de renforcement ont été proposées et étudiées telles que :

- l'utilisation de fibres
- le renforcement continu automatisé
- l'ajout de barres de renforcement (internes ou externes)
- l'insertion de câbles (durant l'extrusion ou après s'il s'agit de câbles de précontrainte).

Même si ces nombreuses pistes ont été exploitées lors de travaux de recherche en laboratoire ou sur quelques chantiers pilotes, elles ne sont pas largement répandues.

### 5.3.1 Renforcement pendant l'impression 3D

Le renforcement par des fibres de dimensions et d'origines diverses (acier, synthétique, verre, p. ex.) a été envisagé. L'ajout se fait soit lors du malaxage du mélange imprimable, soit dans la tête d'impression pour ne pas risquer d'endommager le système de pompage. Ces fibres peuvent améliorer les caractéristiques mécaniques en flexion et réduire le retrait plastique de la pièce imprimée. Les fissures peuvent ainsi être réduites et la qualité du mortier s'en trouve améliorée. Cependant, l'ouvrabilité du mélange, indispensable pour son pompage, diminue avec l'ajout des fibres. En outre, elles confèrent au mortier un comportement anisotrope puisque ses propriétés dépendent de la direction des fibres qui est elle-même affectée par l'orientation préférentielle induite par l'extrusion (voir figure 21). De plus, si des efforts de traction importants se manifestent, l'ajout de fibres peut s'avérer insuffisant.



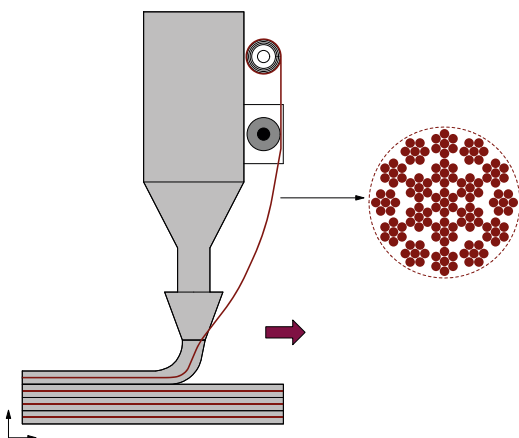
**Fig. 21** Schémas du principe d'impression 3D du béton fibré. Fibres orientées dans la direction d'impression (gauche) et illustration de l'importance de distribuer les fibres dans des directions différentes afin de limiter les fissures (droite).

Le renforcement peut aussi passer par l'insertion manuelle de renforts entre les couches. Des barres d'armature peuvent être déposées horizontalement après l'impression de la couche, comme illustré à la figure 22.

Une méthode de renforcement continu par insertion de microcâbles en acier dans les couches de mortier extrudées a été proposée par l'Université de technologie d'Eindhoven (Pays-Bas). Bien que cette méthode nécessite un dispositif supplémentaire pour insérer le microcâble pendant l'impression, c'est un premier pas vers le renforcement continu automatisé (voir figure 23). La vitesse d'alimentation est réglable pour synchroniser l'impression du béton et l'insertion du microcâble en acier. Un aspect important de cette méthode réside dans le glissement des câbles lorsque l'élément est soumis à des charges.



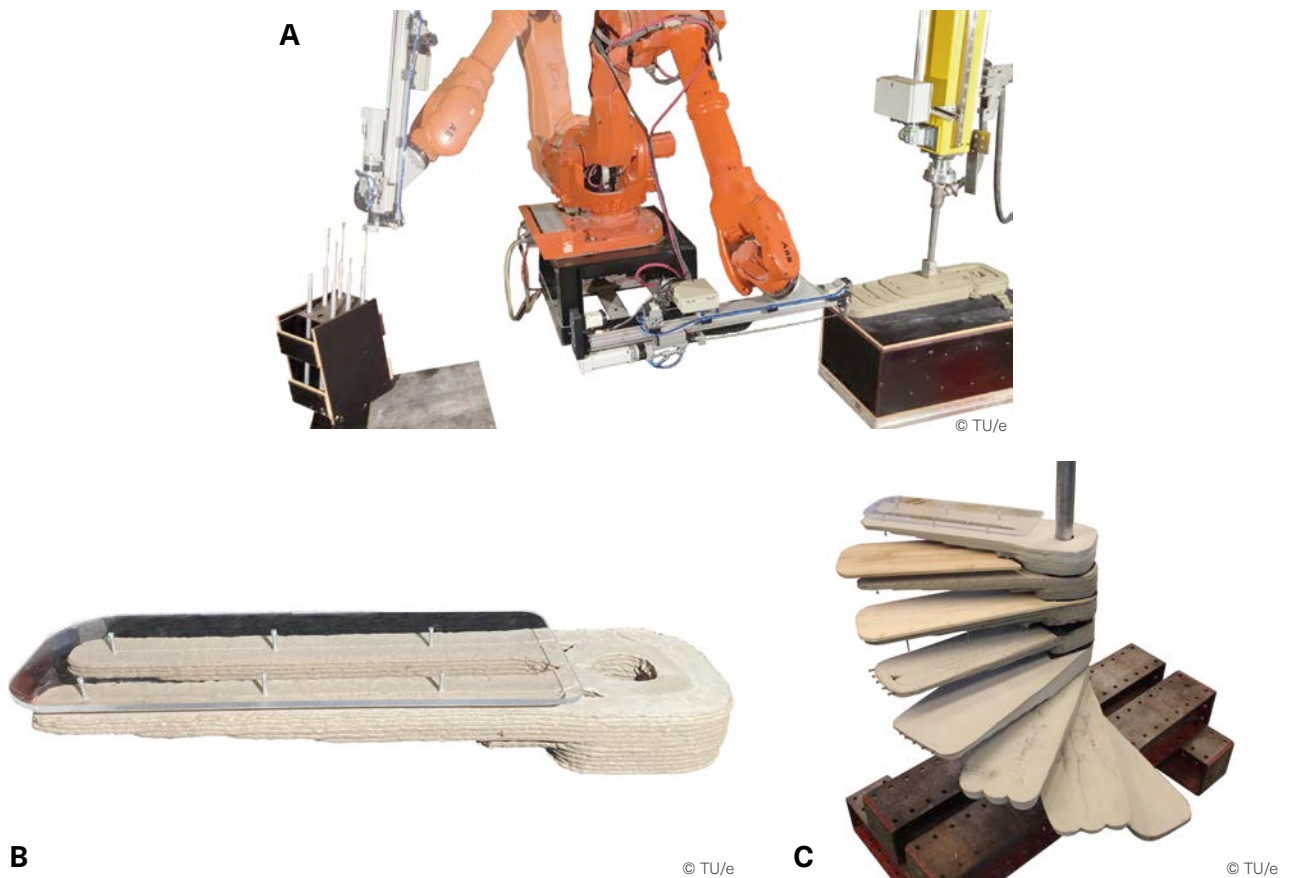
**Fig. 22** Ajout manuel de renforcement entre les couches imprimées (pièce imprimée chez Buildwise en collaboration avec la KU Leuven).



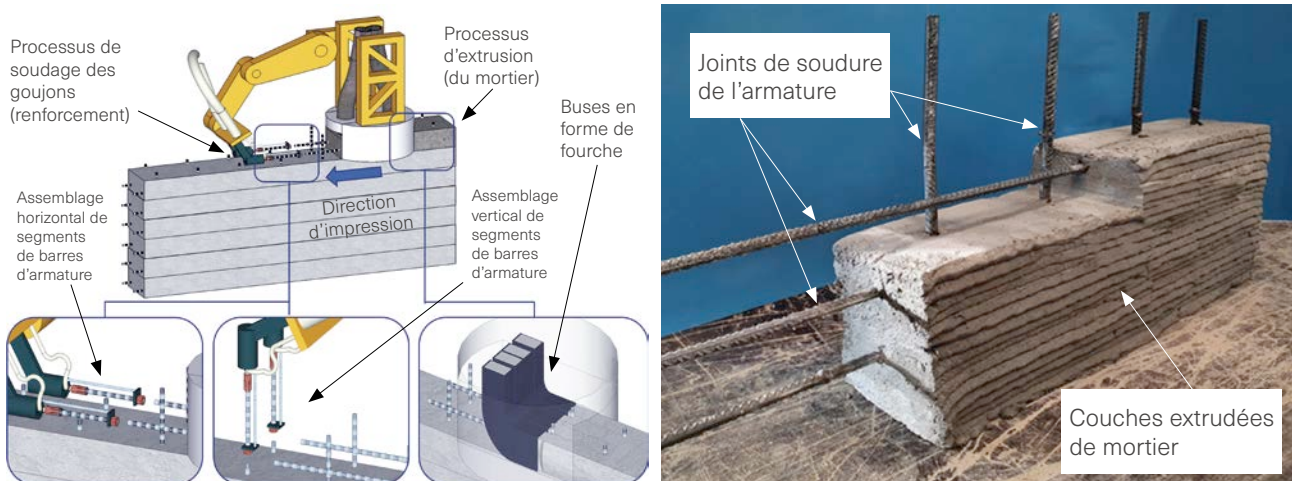
**Fig. 23** Renforcement continu durant l'impression. Schéma de principe (gauche, [M1]) et renforcement avec des câbles métalliques (droite).

Les chercheurs de l'Université de technologie d'Eindhoven (Pays-Bas) explorent également la possibilité d'utiliser un second robot, programmé pour l'insertion multidirectionnelle de tiges d'armature dans un élément en mortier imprimé. Cette technique a été utilisée pour renforcer les marches d'un escalier en spirale (voir figure 24A, p. 28). En outre, le robot a permis d'insérer des vis afin d'assembler les différents éléments constitutifs des marches (voir figures 24B et 24C, p. 28).

Un nouveau procédé hybride d'impression 3D de structures armées est en cours de développement à la KU Leuven, en collaboration avec l'Université d'Aix-la-Chapelle (Allemagne). Le procédé est appelé fabrication additive de béton armé (*Additive Manufacturing of Reinforced Concrete* ou AMoRC). L'AMoRC hybride fait appel à un procédé de soudage de goujons intermittent et à un procédé d'extrusion (voir figure 25, p. 28). Des segments d'armature en acier sont assemblés pour former un treillis tridimensionnel à l'aide du procédé



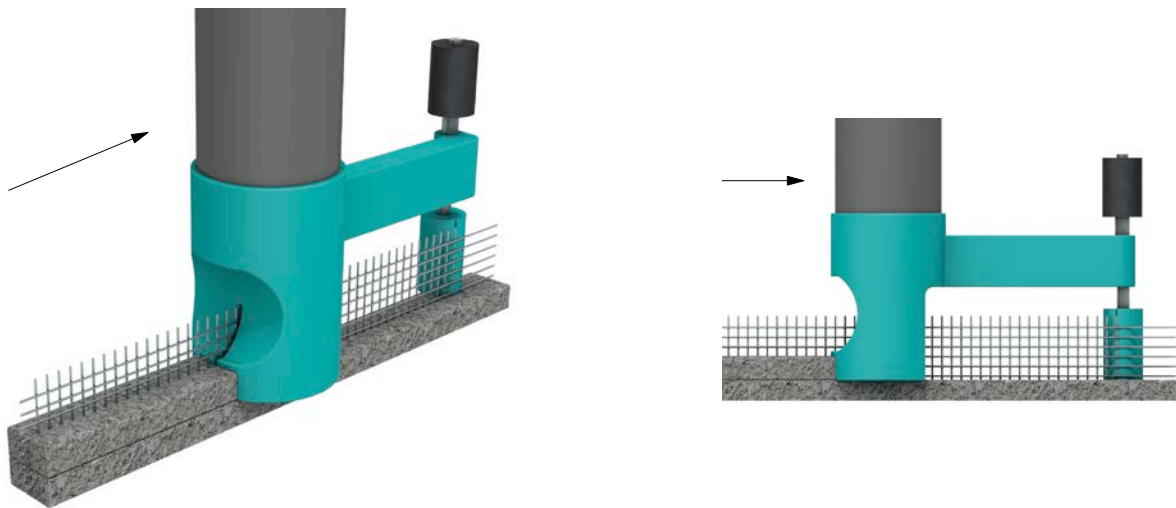
**Fig. 24** Utilisation d'un second robot pour l'insertion d'armatures ou de vis dans un élément imprimé [H1].



**Fig. 25** Principe du procédé AMoRC et prototype imprimé par ce procédé [C1].

de soudage et sont simultanément enveloppés par du mortier extrudé. Par rapport aux approches précédentes, cette technique de renforcement a pour avantage principal de pouvoir ajuster les procédés de soudage et d'extrusion de sorte qu'ils fonctionnent à des vitesses d'alimentation identiques. La synchronisation des deux procédés permet de les combiner dans une tête d'impression hybride pour la production d'un élément armé. Cependant, des recherches sur les performances structurales d'une telle pièce s'avèrent nécessaires.

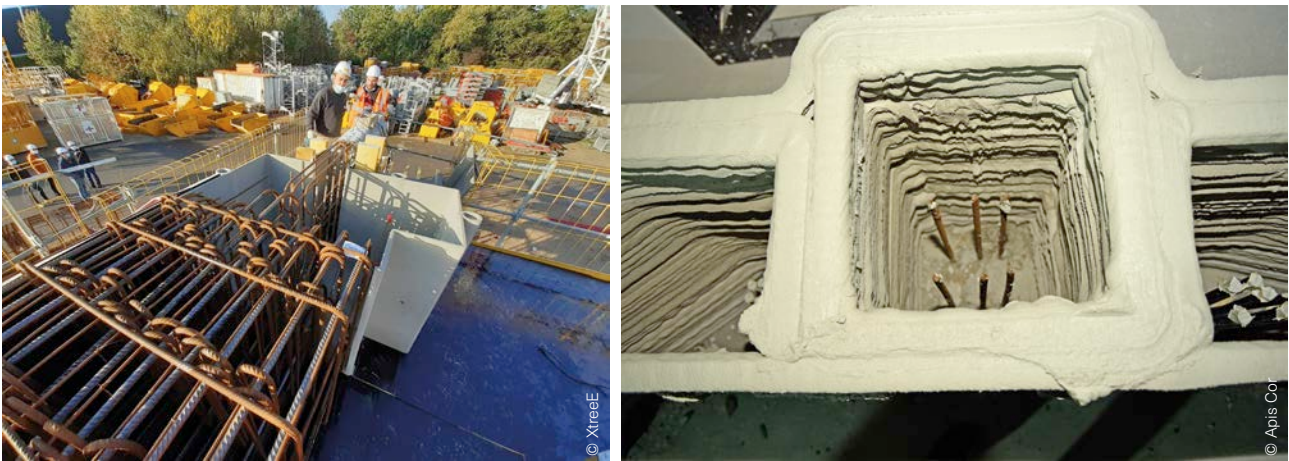
Le procédé de renforcement automatisé proposé par l'Université de Technologie de Swinburne (Australie) est semblable au procédé AMoRC. Il consiste à renforcer les couches avec des treillis ajoutés durant l'extrusion. Ces treillis sont insérés perpendiculairement aux couches et se chevauchent pour simuler une armature continue (voir figure 26, p. 29).



**Fig. 26** Insertion et enrobage du treillis à l'aide d'une buse conçue sur mesure [M2].

## 5.3.2 Renforcement préinstallé

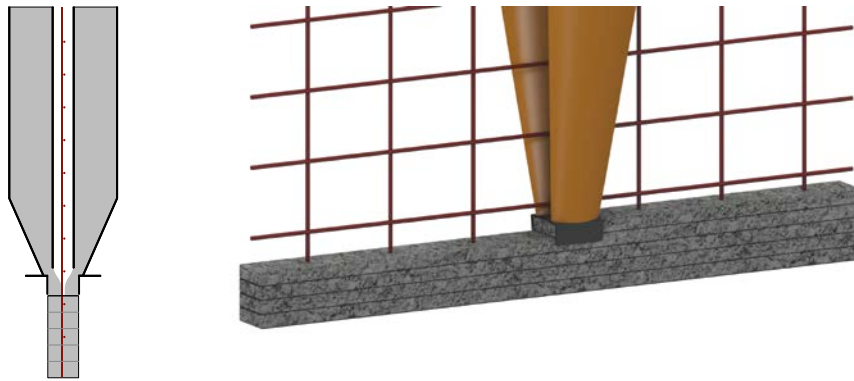
L'impression d'éléments creux constitue une autre solution de renforcement. Imprimer un coffrage permanent offre l'avantage de pouvoir insérer manuellement des barres ou cages d'armature conventionnelles. Un béton autoplaçant est ensuite coulé dans les cavités prévues à cet effet (voir figure 27) et la structure finale sera ainsi armée. Dans ce cas, l'élément imprimé peut être considéré comme un coffrage permanent et non comme un élément destiné à supporter des charges. Le second avantage est de pouvoir passer des câbles électriques et des tuyaux à travers les cavités.



**Fig. 27** Nœud d'une poutre imprimée en 3D servant de coffrage permanent (gauche) et béton coulé dans une colonne imprimée servant de coffrage permanent (droite).

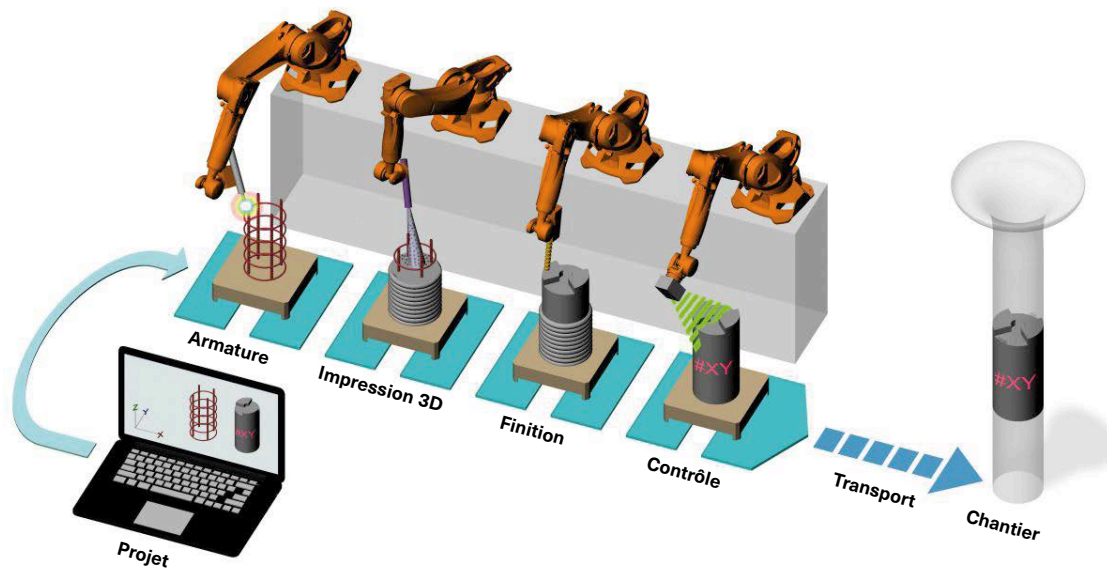
Une nouvelle méthode d'impression de béton renforcé a été développée par l'entreprise chinoise HuaShang Tengda. Dans leur approche, des barres d'armature verticales et horizontales en acier sont préalablement maintenues en place tandis qu'une tête d'impression personnalisée à deux buses dépose des couches de mortier de chaque côté du treillis (voir figure 28, p. 30). Cette méthode permet principalement de construire des pièces totalement armées avec l'impression 3D et a déjà été appliquée dans quelques projets. Cependant, elle restreint la liberté de conception de la forme.

Enfin, un procédé appelé *Mesh Mould* a été développé à l'ETH Zürich (Suisse). *Mesh Mould* fait appel à un robot industriel, équipé d'un dispositif spécialement conçu pour fabriquer automatiquement une cage d'armature



**Fig. 28** Schémas de principe de la méthode développée par la société chinoise HuaShang Tengda consistant en l'impression de couches de mortier de part et d'autre d'un treillis préalablement installé.

dense par découpage, pliage et soudage des barres d'acier. Après la fabrication du treillis, du béton frais est coulé et une couche d'enrobage peut ensuite être ajoutée. En projetant le mortier en un seul processus, les problèmes de stratification inhérents aux autres méthodes de fabrication numérique peuvent être réduits ou éliminés. De plus, le treillis joue le rôle de coffrage fonctionnel qui reste en place. Un procédé similaire, appelé *Shotcrete 3D Printing* (SC3DP), a été développé par l'Université technique de Braunschweig (Allemagne). Un robot assemble la cage d'armature sur laquelle du mortier est ensuite projeté pour fabriquer l'élément. Ce procédé est illustré par une colonne renforcée (voir figure 29).



**Fig. 29** Étapes de construction d'une colonne renforcée par la méthode SC3DP.

### 5.3.3 Renforcement après l'impression 3D

Il est possible d'insérer manuellement des renforts à l'extérieur de l'élément imprimé. La figure 30 montre une poutre composée de segments assemblés par des barres externes. Un scellement est utilisé pour ancrer les barres dans les segments. Il importe de souligner que ce type de renforcement externe nécessite l'utilisation de barres d'armature protégées contre la corrosion (revêtement époxy, galvanisation, acier inox, etc.) qui sont toutefois plus chères que l'acier pour béton traditionnel.



Fig. 30 Poutre renforcée par assemblage d'armatures externes.

Une autre solution réside dans le renforcement des pièces imprimées par la méthode de précontrainte. Cette technique consiste à créer des cavités dans les éléments imprimés qui serviront ultérieurement de conduits pour les câbles de précontrainte. Elle a été appliquée à un pont en mortier imprimé par l'Université de technologie d'Eindhoven (Pays-Bas). Ce pont de huit mètres de long, destiné aux cyclistes et posé à Gemert (Pays-Bas), a été renforcé par l'insertion de microcâbles dans la direction d'impression. Le pont est en outre précontraint dans la direction longitudinale (voir figure 31) à l'aide de câbles en acier ancrés aux blocs d'about. Il fait partie d'un grand projet de construction de routes (projet Noord-Om) mené par la société BAM Infra et commandé par la province du Noord-Brabant (Pays-Bas).



Fig. 31 Pont en mortier imprimé en 3D à Gemert (Pays-Bas).

À l'Université de Gand, un pont à l'échelle du laboratoire (passerelle) a été conçu par optimisation topologique (voir aussi § 4.3, p. 20). Les différents éléments constituant la passerelle ont été imprimés en 3D en collaboration avec Vertico, une entreprise néerlandaise qui a fabriqué une imprimante 3D mobile, et le Technion (Israël). La forme du pont et la trajectoire du câble d'acier en pied de pont ont été optimisées pour minimiser les contraintes (voir figure 32, p. 32).



Fig. 32 Étapes de renforcement d'un pont imprimé par des câbles de précontrainte.

Le tableau 2 résume les particularités et les inconvénients des différentes méthodes de renforcement du mortier imprimé.

Tableau 2 Particularités et inconvénients des différentes méthodes de renforcement du mortier imprimé.

	Méthode de renforcement	Particularités	Inconvénients
Renforcement pendant l'impression	Renforcement discontinu (fibres d'acier, p. ex.)	Amélioration des performances mécaniques et limitation des fissures	Renforcement insuffisant pour des éléments soumis à des contraintes élevées, orientation préférentielle des fibres
	Renforcement continu (câbles métalliques, p. ex.)	Amélioration des performances mécaniques et de la ductilité. Limitation des fissures	Nécessite une tête d'impression personnalisée
	Barres d'armature déposées manuellement entre les couches	Amélioration des performances mécaniques	Nécessite de la main-d'œuvre pendant l'impression et risque d'erreurs humaines
Renforcement préinstallé	Structure préfabriquée en acier ( <i>Mesh Mould</i> , p. ex.)	Amélioration des performances mécaniques et de stabilité	L'application est limitée au mortier projeté
Renforcement après l'impression	Cage d'armature placée dans un élément creux imprimé	Amélioration des performances mécaniques de la structure	L'élément imprimé est uniquement utilisé comme coffrage permanent
	Précontrainte par post-tension	Amélioration des performances mécaniques	Prévoir des emplacements nécessaires aux câbles dans le design
	Renforcement externe	Amélioration des performances mécaniques	Usage d'armatures résistantes à la corrosion



## 5.4 Rendu de surface et reproductibilité

En raison de la nature additive de l'impression 3D, les surfaces latérales des éléments imprimés ne sont pas aussi lisses (effet de strates) que celles des éléments fabriqués de manière traditionnelle par moulage. Le rendu de surface d'une pièce imprimée dépend principalement de l'épaisseur de la couche et de la forme de la buse. L'épaisseur des couches est un paramètre important qui influence le temps d'impression, l'aspect visuel et les propriétés physiques et mécaniques de la pièce imprimée.

Les pièces imprimées peuvent également présenter une porosité résiduelle difficile à détecter à l'œil nu, mais susceptible d'entraîner des défaillances. Par ailleurs, l'interface entre deux couches peut constituer un chemin d'entrée privilégié pour l'eau ou des agents agressifs. Dès lors, il conviendra de garantir une bonne adhérence entre les couches pour conférer aux matériaux de bonnes propriétés mécaniques et de durabilité. Les surfaces plus accrocheuses sont aussi susceptibles de se salir plus rapidement dans un environnement extérieur (poussières, mousses, etc.).

Le post-traitement par des procédés de finition classiques constitue une option pour lisser les surfaces. Une autre manière d'aplanir par talochage la surface latérale des couches imprimées consiste à fixer des truelles sur les côtés de la buse comme illustré à la figure 33. La forme crénelée de cette buse permet par ailleurs de créer une certaine rugosité sur la face supérieure du mortier pour augmenter l'adhérence entre les couches.



Fig. 33 Surface latérale en strates (gauche) et talochage de la surface par des truelles latérales (droite).

Pour les éléments en béton réalisés avec la méthode traditionnelle, des tolérances géométriques, de production et de mise en place sont définies dans la norme européenne NBN EN 13670 [B8], complétée par son annexe nationale belge, la norme NBN B 15-400 [B5]. La norme NBN EN 13369 [B7] reprend également des règles communes pour les produits en béton préfabriqué. L'aspect, la teinte et la texture du béton dépendent principalement de sa composition, de la nature du coffrage (lisse ou texturé, c'est-à-dire qui présente un relief en surface) et de l'éventuel traitement (lavage, bouchardage, etc.) après le décoffrage. Les particularités liées au béton apparent (coulé en place), qui doit répondre à des exigences esthétiques, sont décrites dans la norme belge NBN B 15-007 [B4] et la [NIT 268 'Le béton apparent'](#) [B2]. Pour le béton architectural (préfabriqué), les Prescriptions techniques (PTV) 21-601 [P3] sont d'application.

En impression 3D, la tolérance désigne, en principe, la différence observée entre les dimensions théoriques (mentionnées sur un dessin technique ou un modèle CAO) et les dimensions réelles d'une pièce après sa fabrication. Il n'existe actuellement aucune norme définissant les exigences esthétiques ou les tolérances géométriques pour la construction 3D.

Enfin, il subsiste encore un problème de reproductibilité lors de l'impression 3D de maisons ou de tout autre ouvrage. D'une impression à l'autre, les matériaux peuvent réagir différemment en fonction de paramètres externes et présenter ainsi des propriétés variables. Chaque couche présente un risque d'inexactitude. Par conséquent, la régularité des couches déposées reste difficile à garantir tout au long du processus d'impression. Les spécifications de l'imprimante 3D et les matériaux utilisés représentent les

principaux paramètres de la précision finale de la pièce imprimée. À terme, des recherches seront menées pour répondre aux attentes de précision et de répétabilité de l'impression 3D du béton.

## 5.5 Conditions climatiques

Les conditions climatiques ont une influence significative sur la construction 3D. Par exemple, le temps est très sec et chaud au Moyen-Orient, mais très froid et humide en Europe du Nord. Par conséquent, les paramètres d'impression 3D doivent s'adapter au climat concerné ce qui induit des défis différents. Un travail de recherche et de développement est nécessaire en amont afin d'adapter la technologie, les équipements et surtout les mélanges aux conditions climatiques difficiles (chaleur, froid, vent, pluie). Des projets d'impression 3D réalisés dans des conditions climatiques extrêmes montrent que le procédé peut être adapté si des précautions sont prises en compte.

Dans certains projets imprimés sur site, la zone d'impression a été couverte par une tente pour bénéficier d'une température convenable. C'est le cas de l'impression d'un bureau à Copenhague par la société danoise COBOD (voir figure 34 gauche). En revanche, en Arabie Saoudite, l'ensemble du processus s'est déroulé dans une zone non couverte où les températures atteignent plus de 40 degrés (voir figure 34 droite). Le mélange a toutefois été conçu afin de s'adapter à ces températures élevées.



**Fig. 34** Projets de construction 3D réalisés par les imprimantes COBOD. Bureau imprimé sous tente au Danemark (gauche) et villa de trois étages imprimée en 3D dans une zone non couverte en Arabie Saoudite (droite).

Face à une situation météorologique défavorable, comme des pluies soutenues, l'installation d'une tente constitue la solution la plus efficace pour une impression sur site. Toutefois, si les conditions climatiques le permettent, elle n'est pas nécessaire. PERI, fabricant et fournisseur de systèmes de coffrage, d'étalement et d'échafaudage, a pris l'initiative d'imprimer en 3D les murs d'une petite maison lors de l'exposition Bauma qui s'est tenue pendant sept jours à Munich (Allemagne) (voir figure 35). L'impression a eu lieu à l'extérieur, sans tente, et s'est poursuivie même pendant les périodes de pluie.



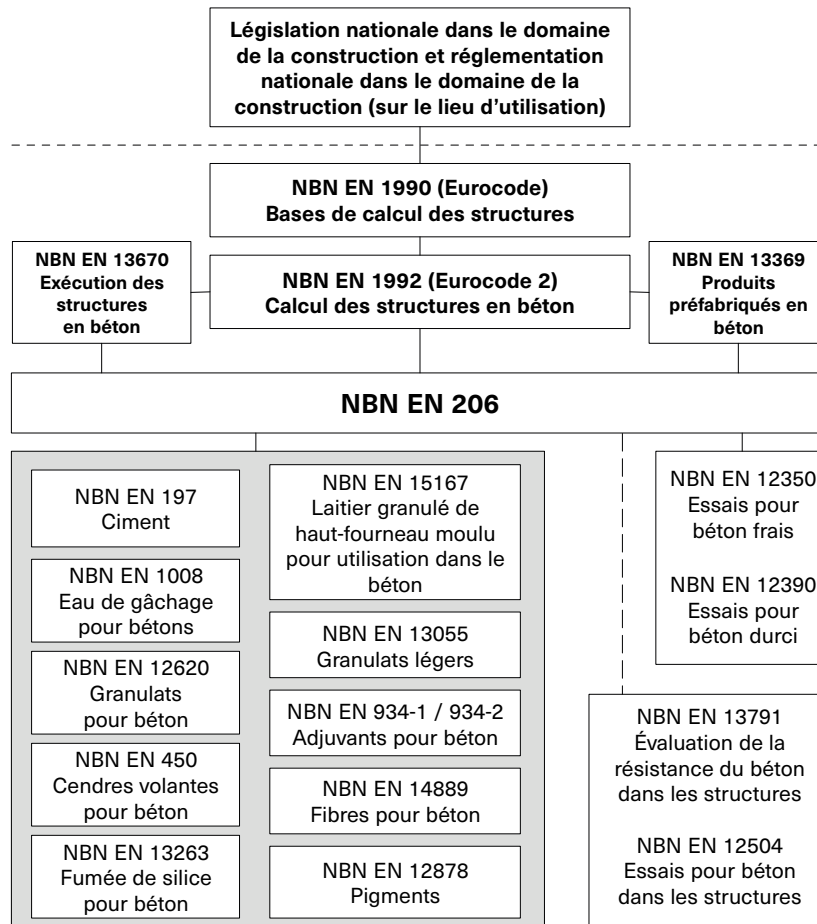
**Fig. 35** Impression en 3D des murs d'une petite maison, à l'extérieur, lors de l'exposition Bauma en Allemagne.

# 5.6 Absence de codes et de règlements

Il importe de souligner que les normes ne sont pas des lois, mais des bonnes pratiques, et s'appliquent volontairement par les personnes concernées (fabricants, fournisseurs, clients, etc.). Elles ne revêtent donc par nature aucun caractère contraignant. Il est toutefois possible qu'une norme devienne obligatoire pour le marquage CE ou lorsque les lois, réglementations (PEB, p. ex.) et contrats (cahier spécial des charges, p. ex.) y renvoient. En cas de litige ou de dégâts, les normes sont toujours considérées comme des règles auxquelles il est préférable de se référer.

Le béton est encadré par un contexte normatif et réglementaire visant à optimiser sa qualité et la durabilité des ouvrages. Pour les bétons de structure de bâtiments et d'ouvrages de génie civil, les spécifications sont définies dans la norme européenne NBN EN 206 [B14] et son annexe nationale belge, la norme NBN B 15-001 [B3]. Ces normes contiennent des règles précises relatives à la spécification, aux performances, à la production et au contrôle de la conformité des bétons. Elles s'appliquent au béton destiné aux structures coulées en place et aux structures préfabriquées pour les bâtiments. Des exigences complémentaires ou des modes opératoires d'essai différents peuvent être définis pour des types de béton et des applications spécifiques, notamment pour le béton avec un diamètre maximal des granulats ( $D_{max}$ ) inférieur ou égal à quatre millimètres (mortier). Pour les produits préfabriqués, des exigences complémentaires sont fournies dans la norme NBN EN 13369 [B7] ainsi que dans les normes produit spécifiques à chaque type d'élément.

Le respect des normes NBN EN 206 [B14] et NBN B 15-001 [B3] est exigé par les normes concernant le dimensionnement des structures en béton (Eurocodes et, en particulier, la norme NBN EN 1992 [B12] ou Eurocode 2) ainsi que les normes traitant de l'exécution des ouvrages et des structures en béton (normes NBN EN 13670 [B8] et NBN B 15-400 [B5]) (voir figure 36). Les Eurocodes structurels et les normes qui y sont apparentées (exécution, matériaux, méthodes d'essai) servent donc de base pour la conception et la mise en œuvre des structures.



**Fig. 36** Relations entre la norme NBN EN 206 [B14] et les normes de calcul et d'exécution, les normes relatives aux constituants et les normes d'essais pour béton à l'échelon européen.

L'une des fonctions les plus importantes des normes réside dans leur rôle d'outil pour assurer la durabilité et la performance des structures civiles et des bâtiments. Aujourd'hui, il est techniquement possible d'imprimer des maisons. Cependant, certaines interrogations et ambiguïtés subsistent quant au cadre normatif de la construction 3D.

À ce jour, l'absence de normalisation freine l'adoption de l'impression 3D dans le secteur. En effet, les critères de performances pour les matériaux de construction imprimables ne sont couverts par aucune norme ou recommandation technique, signe que ce procédé de construction n'est pas encore reconnu comme tel. En outre, les structures imprimées différant des structures traditionnelles, les calculs de résistance et de tenue dans le temps sont difficiles à réaliser. Une évaluation technique s'avère dès lors indispensable (l'agrément technique (ATG) constitue un des moyens de promouvoir les innovations en Belgique, p. ex.) (voir aussi § 9.1, p. 59).

L'absence de normes pour l'impression 3D a conduit certains projets à imprimer des coffrages ou des murs creux. Du béton traditionnel y est ensuite coulé et le treillis est ajouté dans certaines cavités afin de répondre aux normes actuelles (voir aussi § 5.3.2, p. 29). Par exemple, Batiprint 3D a choisi d'imprimer en 3D les parois des murs de ses logements étudiants *Yhnova* en polyuréthane (une matière isolante), et de couler du béton traditionnel entre elles. Cette technologie étant certifiée, la startup étudie les moyens d'ajouter plusieurs étages à ses logements.

Dans plusieurs pays, comme la France et les Pays-Bas, outre les permis d'urbanisme, certains concepteurs ont opté pour des certifications visant à réaliser des projets d'impression 3D tels que des maisons. Le permis d'urbanisme étant délivré par la municipalité, le projet est géré localement. Afin de garantir la sécurité et d'obtenir le permis, une collaboration intensive est requise. C'est souvent l'entrepreneur qui s'occupe de la mise en œuvre technique et la transmet aux autorités qui examinent ensuite les choix structuraux et l'argumentation vis-à-vis d'un certain nombre de critères d'évaluation. La garantie relative à la sécurité repose principalement sur des essais et des méthodes d'essai ayant été (en partie) récemment développés. Cette démarche est souvent coûteuse en raison des tests intensifs supplémentaires qu'elle nécessite. Il appartient donc à la municipalité de déterminer si le projet démontre une sécurité suffisante. Lorsque l'ouvrage répond à toutes les exigences urbanistiques et constructives en vigueur, le permis est délivré. Dans le cadre du projet français *Viliaprint*, un nouveau mode constructif en impression 3D du béton a obtenu sa certification par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) par le biais de la procédure ATE<sub>x</sub> (Appréciation Technique d'Expérimentation). Elle atteste le respect de certaines fonctionnalités déduites de l'application visée (isolation, sécurité, imperméabilité, durabilité, résistance mécanique, etc.). En 2022, *Plurial Novilia* a inauguré les cinq premières maisons réalisées en combinant l'impression 3D de murs en béton hors site et la préfabrication d'éléments traditionnels. Il ne s'agit pas de murs servant de coffrages permanents, mais bien de murs porteurs.

Reconnaissant la nécessité de fournir aux innovations une voie potentielle vers le marché de la construction, l'Eurocode 0 [B11] offre la possibilité de développer des conceptions structurelles partiellement basées sur des essais expérimentaux spécifiques au projet, plutôt que généralisés. L'annexe D 'Dimensionnement assisté par l'expérimentation' détaille le type d'expériences pouvant être réalisées et les réglementations relatives à l'évaluation statistique des résultats. Sur la base des possibilités ainsi offertes par l'Eurocode pour s'écarter des règles de calcul généralisées, un protocole d'essai peut être élaboré. C'est le cas du pont pour vélos imprimé en 3D aux Pays-Bas. Initialement, une campagne d'essais mécaniques a été réalisée pour obtenir les propriétés pertinentes du matériau structural (annexe D, catégorie b) telles que la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module d'élasticité. Les propriétés mécaniques du matériau appliqué, un mortier d'impression commercialisé par Weber, ont été établies dans un vaste programme expérimental. Les données ont été utilisées pour définir les dimensions finales et le niveau de précontrainte requis des câbles. L'état limite ultime (ELU) a été calculé sur la base des facteurs de charge communs de la norme NBN EN 1992-1-1 [B13] et des propriétés mécaniques.

L'élaboration de normes relatives au mortier ou au béton imprimé, ainsi que de logiciels associés pour calculer et analyser les futures structures imprimées, s'avère indispensable pour les professionnels qui s'occupent de la conception de bâtiments et de constructions 3D. Depuis peu, des commissions et des groupes de travail, dont la RILEM (Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages) et l'ACI (*American Concrete Institute*), se penchent sur la question pour combler progressivement ces lacunes.

# 6. Matériaux pour la construction 3D

## 6.1 Compositions des mortiers imprimables

Les mortiers prêts à l'emploi présentent des particularités propres en fonction des types et des dosages de matières premières et d'adjuvants. Parmi ces mortiers, une majorité peut être produite pour répondre aux spécificités de chaque usage (temps de prise, aptitude au pompage, mise en œuvre, capacité portante, durabilité, etc.). La présence de gros granulats permet de contribuer à la résistance mécanique du mortier, d'améliorer sa durabilité (réduction du retrait total) et de réduire son prix en raison de la plus faible quantité de ciment.

En revanche, le béton prêt à l'emploi destiné à être mis en œuvre de manière traditionnelle (par coulage) ne répond pas aux exigences spécifiques requises pour les matériaux destinés à l'impression 3D. En raison de la limitation de la taille de la buse et du rendu de surface visé, les mélanges imprimables ne contiennent pas de gros granulats. Une granulométrie maximale de deux millimètres est un choix courant pour la plupart des projets imprimés en 3D. Par conséquent, la terminologie adéquate pour désigner les mélanges imprimables devrait être 'mortiers imprimables ou micro-bétons imprimables' et non 'bétons imprimables'.

Pour répondre aux différentes contraintes de rhéologie, une grande quantité de ciment à prise rapide est utilisée dans les mélanges imprimables. Ainsi, le matériau est suffisamment fluide pour être acheminé par pompage et suffisamment rigide pour ne pas s'affaisser sous son propre poids et celui des couches suivantes (voir § 6.2, p. 38). Dans certains cas, un ajout d'accélérateur de prise au niveau de la tête d'impression s'avère nécessaire pour offrir au mélange la rigidité requise.

C'est pour cette raison que la majorité des projets de démonstration actuels n'ont pas été imprimés avec du vrai béton, mais avec des mortiers prêts à l'emploi (adjuvantés ou non adjuvantés) auxquels il suffit d'ajouter de l'eau (et éventuellement d'autres adjuvants qui modifient leur viscosité et leur prise). Ces derniers sont spécifiquement développés pour cette application et se caractérisent le plus souvent par une très forte teneur en ciment (surtout en ciment Portland CEM I 52,5 R). Toutefois, ces mortiers ont une empreinte carbone élevée et sont plus chers qu'un béton ordinaire. Quelques mortiers imprimables sont déjà proposés sur le marché mais l'offre reste encore assez limitée. Il faut également garder à l'esprit que certaines imprimantes ne sont compatibles qu'avec les mélanges développés par le fabricant de la machine ce qui restreint d'autant plus le choix.

En outre, l'absence de gros granulats et la forte teneur en ciment à prise rapide peuvent aggraver le problème du retrait et affecter ainsi les performances de durabilité des pièces imprimées. Certains mélanges prêts à l'emploi contiennent des fibres (de polypropylène, p. ex.) pour contrôler les fissures de retrait plastique (voir § 5.3.1, p. 26). Afin d'éviter ou de limiter la dessiccation de la pièce imprimée, il est possible de pulvériser un produit de cure, de protéger la pièce avec une feuille plastique pendant toute la période de durcissement ou de l'imprimer dans un environnement à température et humidité contrôlées. L'usage d'adjuvants réducteurs de retrait pourrait constituer une option pour diminuer le retrait du mortier imprimable. Aucune étude ni aucun retour d'expérience n'a encore démontré que les maisons imprimées enregistraient des performances égales ou supérieures à celles des maisons construites selon les méthodes traditionnelles. En effet, vu le stade de développement de l'impression 3D, il est difficile d'estimer avec précision la durée de vie d'une maison imprimée en 3D.

La priorité actuelle pour rendre la construction par impression 3D plus écologique est de réduire la quantité de ciment Portland dans les mélanges imprimables et de le remplacer par d'autres types de ciment à plus faible empreinte carbone (ciments binaires ou ternaires contenant moins de clinker, matériaux alcali-activés, etc.). Bien que les matériaux cimentaires soient toujours prédominants pour de nombreux projets de construction 3D, il peut être intéressant de s'orienter vers des matériaux naturels disponibles localement, tout en vérifiant leur compatibilité avec la machine d'impression.

Des initiatives visant une impression 3D écologique ont été lancées afin de réduire l'empreinte carbone des mélanges imprimables et de faire face aux pénuries de ressources naturelles (voir aussi § 4.3, p. 20). Les difficultés liées à la substitution du liant et du squelette granulaire sont multiples. Les additions minérales peuvent rendre le mortier plus ou moins fluide qu'initialement et influencer dès lors les propriétés d'extrudabilité et de constructibilité. Les résistances mécaniques et la durabilité peuvent aussi avoir une incidence significative selon la nature du matériau utilisé et le taux de substitution du ciment.

C'est dans cette optique que les laboratoires de recherche s'attellent à optimiser l'incorporation de sous-produits industriels et d'additions minérales en combinaison avec du ciment Portland dans les mortiers imprimables. Il s'agit, par exemple, de filler calcaire, un coproduit des secteurs du granulat et de la chaux, de laitier de haut-fourneau, un résidu de l'industrie sidérurgique, et de cendres volantes issues de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques, ces deux derniers ayant toutefois tendance à se raréfier. Tous ces matériaux ont été utilisés dans les mélanges pour l'impression 3D afin de remplacer partiellement, voire totalement, le ciment Portland. Outre certains ciments composés déjà bien présents sur le marché belge (les ciments de haut-fourneau de type CEM III, p. ex.), ces recherches ouvrent la voie à de nouveaux types de ciments ternaires 'bas carbone' définis dans la norme NBN EN 197-5 [B10]. Il s'agit du ciment Portland composé CEM II/C-M et du ciment composé CEM VI.

Des matériaux de substitution ont été également envisagés pour le squelette granulaire du mortier, composé le plus souvent de sable naturel. Ainsi, le projet européen CIRMAP vise à remplacer totalement le sable naturel par du sable recyclé, constitué le plus souvent de béton concassé issu de la démolition de bâtiments (voir figure 18, p. 22). Enfin, des chercheurs de l'Université du Texas (États-Unis) proposent une nouvelle palette de matériaux de construction d'origine naturelle à base de terres, qui sont reconfigurés dans des formulations extrudables et compatibles avec la fabrication additive de bâtiments [B1].

## 6.2 Caractéristiques recherchées pour le mélange imprimable

Au-delà des capacités d'une imprimante 3D et des paramètres d'impression, le choix du matériau reste un élément primordial dans la réussite de la construction 3D. Plusieurs recherches se sont concentrées sur la formulation et la caractérisation des mélanges adaptés à la construction 3D. Chaque matériau possède des propriétés bien distinctes qui peuvent avoir une incidence sur le résultat final. Trois paramètres doivent être pris en compte dans le développement des matériaux pour l'impression 3D :

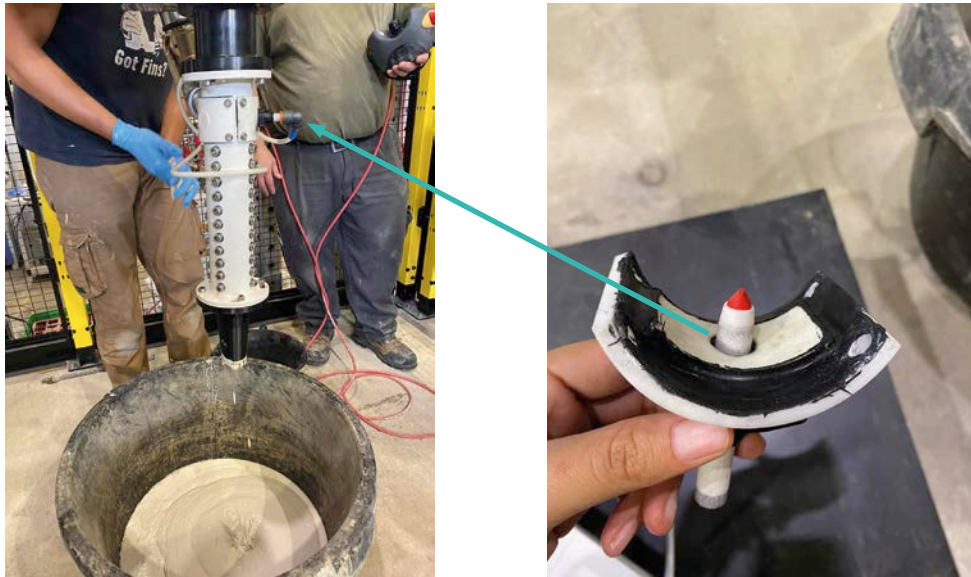
- la rhéologie
- les performances mécaniques
- la durabilité.

La rhéologie couvre le comportement des matériaux à l'état frais, à savoir l'ouvrabilité, la maniabilité et le durcissement. Les caractéristiques mécaniques et la durabilité sont définies en fonction de l'application finale du projet (élément portant, zones à risques, classes d'exposition et d'environnement, etc.).

La mise au point du microbéton ou du mortier en impression 3D constitue un vrai défi. Le mélange imprimable est une composition particulière qui combine idéalement les avantages du béton projeté et du béton autoplaçant. En effet, le mélange doit tout d'abord avoir la bonne consistance (fluidité et stabilité sous pression) pour pouvoir être poussé dans un tuyau par une pompe et extrudé à travers un orifice de section donnée (buse) sans présenter de signes de ségrégation ou de risques de blocage. La géométrie de la buse dépend fortement des paramètres matériaux (diamètre maximal des granulats). Une fois extrudé de la buse, le mélange doit être suffisamment ferme pour ne pas s'affaisser sous l'effet de son poids propre, ni se déformer sous le poids des couches suivantes.

En résumé, l'ouvrabilité du mélange doit être adaptée au processus de pompage, au débit d'extrusion hors de la tête d'impression et à la vitesse d'impression. Par ailleurs, elle doit offrir une prise rapide pour éviter l'effondrement de la structure et permettre d'imprimer un ouvrage vertical en continu. Un mélange imprimable consiste ainsi en un mélange **pompable, extrudable et constructible** (voir figure 37c, p. 39), c'est-à-dire un mélange fluide à prise rapide. Ces caractéristiques contradictoires (fluide avant l'extrusion et ferme après)

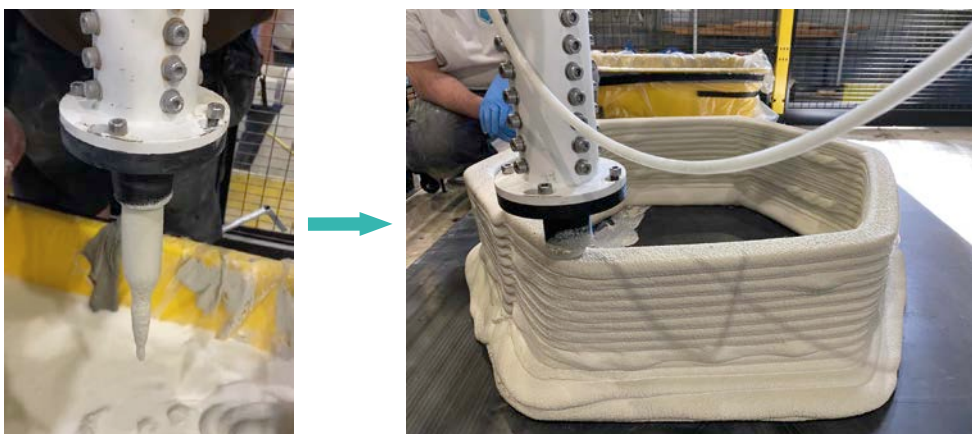
et complexes ont conduit à la mise au point de différents modèles de têtes d'impression (sans mélangeur ou à mélangeur statique ou dynamique, avec possibilité d'ajouter des adjuvants), à la limitation des gros granulats dans la composition du mélange (diamètre maximal déterminé par la taille de la buse) et à l'ajout d'adjuvants et d'additifs pour obtenir une consistance adaptée (superplastifiant, accélérateur de prise, agent de viscosité, etc.).



**Fig. 37a** Essais d'impression 3D réalisés chez Buildwise.  
Injection d'accélérateur de prise dans la tête d'impression équipée d'un mélangeur dynamique.



**Fig. 37b** Essais d'impression 3D réalisés chez Buildwise.  
Mélange jugé trop fluide (affaissement élevé, mélange non constructible).



**Fig. 37c** Essais d'impression 3D réalisés chez Buildwise.  
Mélange imprimable jugé acceptable (pompable, extrudable et constructible).



**Fig. 37d** Essais d'impression 3D réalisés chez Buildwise.  
Mélange jugé trop ferme (non extrudable).

Un écoulement fluide, stable et non frottant du mélange durant le pompage peut être obtenu en incorporant des additions minérales comme des fillers calcaires ou des cendres volantes, en employant une fraction granulaire de dimension limitée ( $D_{\max}$  le plus souvent entre deux et quatre millimètres) et en intégrant des adjuvants comme le superplastifiant et l'agent de viscosité. On peut encore recourir à d'autres matières minérales pour répondre aux caractéristiques particulières recherchées (argile ou bentonite pour modifier la thixotropie, p. ex.). Cependant, la rapidité du durcissement des mélanges après l'extrusion reste un défi majeur pour l'impression 3D. En effet, il n'est pas possible d'obtenir la rigidification désirée après l'extrusion du matériau uniquement par la structuration<sup>(5)</sup> et l'hydratation du ciment. Le mortier doit rapidement passer d'un état fluide à un état plus ferme. Pour ce faire, un accélérateur de prise est souvent incorporé dans le mélange prêt à l'emploi (sous forme sèche) ou injecté et mélangé avec le mortier fluide dans la tête d'impression (voir figure 37a, p. 39). Le type d'accélérateur est choisi en tenant compte de sa compatibilité avec les autres constituants. La quantité doit être ajustée selon le type de ciment, la forme et la taille de la pièce à imprimer, le débit d'extrusion, la vitesse d'impression (déplacement de la tête) et le délai d'impression entre deux couches (selon la longueur du cordon). Par exemple, pour l'impression de petites surfaces, le délai entre le dépôt de deux couches successives est réduit. La couche de mortier déposée n'a parfois pas le temps de durcir suffisamment pour supporter le poids de la couche suivante (voir figure 37b, p. 39). Dans ce cas, il faut augmenter la quantité d'accélérateur de prise injectée dans la tête d'impression. En revanche, une rigidification élevée induite par une quantité trop importante d'accélérateur de prise ou à un délai d'attente très long entre deux couches (arrêt temporaire de la machine, p. ex.) peut aboutir à un blocage dans la tête d'impression (voir figure 37d) et à d'éventuels problèmes d'adhérence entre les couches. Une forte maîtrise de la rhéologie d'un mortier à prise rapide est donc exigée.

Des substituts au ciment Portland ont été utilisés (notamment des ciments spéciaux et des ciments composés) pour disposer de produits cimentaires présentant une grande réactivité et une augmentation rapide de la résistance. Par exemple, le ciment alumineux à base d'aluminates de calcium accélère le durcissement des couches de mortier, ce qui accroît la vitesse de construction verticale. Les ciments spéciaux peuvent aussi être utilisés pour l'impression 3D du béton lorsque le matériau est soumis à une exposition rigoureuse ou à des conditions environnementales particulières. Des exemples de compositions cimentaires en impression 3D brevetées par la société Vicat, ainsi que leurs propriétés rhéologiques et mécaniques, sont présentés dans le tableau 3 (p. 41).

En résumé, l'utilisation de ciment à prise et à durcissement rapides et d'autres composants (cendres volantes, fumée de silice, accélérateurs ou autres adjuvants) permet de régler le comportement rhéologique et de réduire le temps de prise des matériaux à imprimer. Il reste néanmoins des défis pour envisager des constructions rapides d'une hauteur très élevée puisque le poids des couches successives induit une forte pression sur les

<sup>(5)</sup> Il s'agit d'un phénomène physique d'origine colloïdale réversible ne devant pas être confondu avec la prise du matériau qui est un phénomène chimique irréversible (comportement thixotropique, voir § 3.1, p. 11).



couches inférieures. De plus, l'impression 3D nécessite un apport continu en matériaux. Les arrêts d'extrusion et la consistance du mélange affectent l'adhérence entre les couches et pourraient créer des zones poreuses, préjudiciables à la durabilité à long terme de l'ouvrage imprimé. Enfin, il convient d'éviter le retrait du mortier en cas de séchage trop rapide pour limiter les fissures (voir aussi § 6.1, p. 37).

**Tableau 3** Exemples de compositions cimentaires brevetées par Vicat  
(numéro de publication internationale en matière de brevets : WO2020/021202A1).

Référence du mélange	Constituant		Proportion [% masse]	Étalement au cône sans secousses selon la NBN EN 1015-3 [B6] [mm]	Résistance à la compression à 28 jours [MPa]
E-1	Premix	Ciment Portland CEM I 52,5 R	28,1	175 (sans accélérateur de prise)	92,1 (avec accélérateur de prise)
		Filler calcaire	33,2		
		Métakaolin	0,5		
		Sable	38,3		
	Adjuvants liquides	Superplastifiant	1,6 (% liant)		
		Accélérateur de prise	variable		
Eau	E/C = 0,48				
E-2	Premix	Ciment Portland CEM I 52,5 R	17,5	152,5 (sans accélérateur de prise)	86,2 (avec accélérateur de prise)
		Ciment sulfoalumineux	7,5		
		Filler calcaire	20		
		Métakaolin	5		
		Sable	50		
	Adjuvants secs	Retardateur de prise	0,5 (% liant)		
		Accélérateur de prise	0,4 (% liant)		
	Adjuvants liquides	Superplastifiant	1,5 (% liant)		
		Accélérateur de prise	variable		
	Eau	E/C = 0,55			

## 6.3 Caractérisation à l'état frais des mélanges imprimables

En l'absence d'essais normalisés, de nombreuses études ont été menées pour définir et caractériser un mortier imprimable. Il est primordial de tester l'imprimabilité du mélange en amont pour vérifier s'il est adapté et éviter ainsi un blocage ou un effondrement. En effet, un blocage dans le tuyau de pompage peut aboutir à des pertes économiques considérables (arrêt inopiné du processus d'impression, démontage des tuyaux et gaspillage des matériaux). Ces études se limitent aux mélanges et aux paramètres machine testés. L'imprimante utilisée, la forme de la buse, le débit d'extrusion et la vitesse d'impression ont montré leur influence sur la qualité de la couche imprimée. Les études réalisées en laboratoire ont permis de proposer des méthodes pour vérifier, à petite échelle, l'imprimabilité des mélanges développés. Chaque méthode d'essai permet de vérifier une ou plusieurs caractéristiques du mortier imprimable telles que la pompabilité, l'extrudabilité ou la constructibilité.

Afin d'évaluer le débit et le seuil d'écoulement du mélange à la sortie de la buse (extrudabilité), le laboratoire français Navier a mis un test au point. Il consiste à déterminer le seuil d'écoulement du mélange à partir du

poids de la goutte sortant de la buse (voir figure 38). En effet, la goutte s'écoule et se rompt lorsque la pression de son propre poids dépasse son seuil d'écoulement. Ainsi, plus la masse de la goutte est élevée, plus le seuil d'écoulement du matériau est important. Le seuil d'écoulement est ensuite corrélé à l'imprimabilité du matériau. Cet essai est approprié pour ajuster les paramètres d'impression en fonction de la mesure du seuil d'écoulement à la sortie de la buse de sorte à garantir une impression réussie. Des modèles théoriques, basés sur l'évolution du seuil d'écoulement d'un matériau, ont été également proposés par des chercheurs afin de prédire l'imprimabilité d'un matériau [P2].

$$\tau_0 = mg/\sqrt{3\pi r^2}$$

où  $\tau_0$  exprime le seuil d'écoulement (en Pa),  $m$  la masse d'une goutte (en kg) et  $r$  le rayon de la buse (en m).



**Fig. 38** Principe du *Slugs-test* pour déterminer le seuil d'écoulement du mortier.

Un simple pistolet à silicone pourrait être utilisé pour vérifier manuellement l'extrudabilité d'un mélange à travers une taille de buse prédéfinie, comme illustré à la figure 39.

En outre, un test de pénétration (Fall cone, Vicat, etc.) permet de mesurer le caractère constructible d'un mélange. Ainsi, l'essai Vicat consiste à évaluer le temps de prise selon la profondeur de pénétration d'une aiguille dans le mortier. L'aiguille s'enfonce de moins en moins au cours du temps, ce qui traduit la cinétique d'hydratation du ciment.



**Fig. 39** Pistolet à silicone utilisé pour tester l'extrudabilité du mélange imprimable (gauche) et exemple de couches imprimées par ce pistolet (droite).

Certains laboratoires ont développé des petites imprimantes pour étudier l'extrudabilité et la constructibilité d'un mélange avant son impression à grande échelle. La figure 40 illustre l'imprimante à l'échelle laboratoire utilisée chez Buildwise.

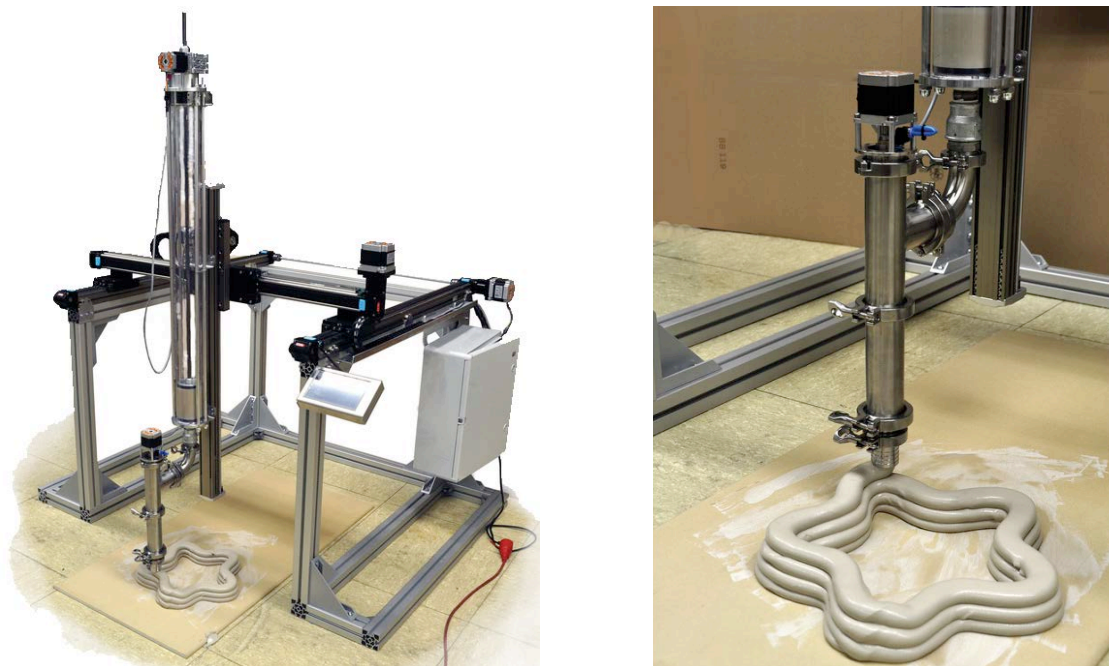


Fig. 40 Imprimante 3D à l'échelle laboratoire utilisée chez Buildwise.

L'ensemble des recherches menées a permis d'attribuer deux termes spécifiques supplémentaires au mortier destiné à l'impression 3D, à savoir la **limite d'imprimabilité** et la **limite de blocage**. La limite d'imprimabilité est la période la plus longue pendant laquelle un mélange peut être imprimé avec une qualité d'impression acceptable. La limite de blocage est la période la plus longue pendant laquelle un mélange peut rester dans la buse avant que le mortier ne se raidisse et bloque l'extrusion. Les deux limites doivent idéalement être mesurées et rapportées pour chaque mélange spécifique.

## 6.4 Performances mécaniques des pièces imprimées

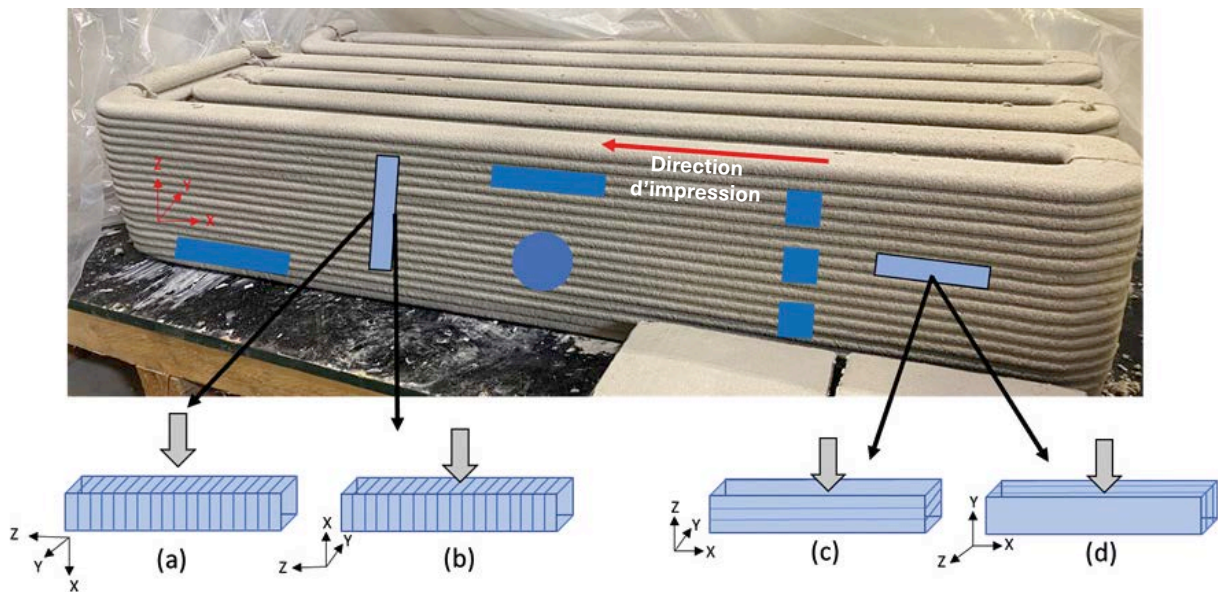
Le béton coulé en place possède un comportement mécanique relativement isotrope<sup>(6)</sup>. En revanche, les éléments en mortier imprimés sont caractérisés par un comportement mécanique anisotrope, ce qui signifie que les performances mécaniques dépendent des directions de sollicitation par rapport à la direction d'impression. Cette anisotropie est due aux hétérogénéités induites par les vides d'air et l'adhérence entre les couches successives. Si l'adhérence entre les couches est de bonne qualité, cela pourrait minimiser l'anisotropie et générer un comportement quasi isotrope. Les performances mécaniques des pièces imprimées dépendent ainsi des paramètres machine (vitesse de déplacement de la tête d'impression, débit, etc.).

En outre, la structure stratifiée due au dépôt couche par couche fait varier les performances mécaniques (résistances à la compression, à la flexion et à la traction) dans les trois axes définis respectivement par la direction du dépôt, la largeur de la couche et la hauteur de la pièce imprimée (respectivement x, y et z à la figure 41, p. 44). En effet, les propriétés au sein du cordon de dépôt diffèrent des propriétés entre cordons,

<sup>(6)</sup> L'isotropie caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction.

ce qui engendre un écart entre les performances mécaniques mesurées sur des échantillons prélevés à différents endroits d'une pièce imprimée et selon différentes directions. Le mortier imprimé présente donc également un comportement orthotrope<sup>(7)</sup>.

L'utilisation de méthodes d'essai normalisées pour le béton et le mortier conventionnels ne convient pas forcément aux structures imprimées. La révision des normes existantes ou l'adoption de nouvelles réglementations pour étudier les performances mécaniques du mortier imprimé est nécessaire. De plus, le degré d'orthotropie d'une structure imprimée est un élément essentiel afin d'évaluer son comportement mécanique global. C'est pourquoi il est nécessaire d'extraire ou de carotter des éprouvettes à différents endroits, dans différentes directions, et de les tester selon différentes orientations, comme illustré à la figure 41. Les caractéristiques mesurées pourraient ainsi être comparées à celles obtenues sur le même matériau mis en œuvre par moulage (comportement isotrope).



**Fig. 41** Prélèvement d'échantillons dans une pièce imprimée pour l'étude des performances mécaniques et de durabilité.

Les mortiers imprimés pourraient présenter des performances mécaniques plus élevées que celles du même matériau coulé dans des moules. Ceci pourrait s'expliquer par l'effet bénéfique de l'extrusion sur la densité du mortier (diminution de la porosité totale).

En général, les résistances à la compression les plus élevées sont mesurées lorsque la charge est appliquée perpendiculairement à la direction d'impression sur des prismes extraits dans le sens de la coulée (voir figure 41 (c)). En effet, la surface d'adhérence entre deux couches présente une porosité plus élevée qu'au sein du cordon. Les pièces imprimées en mortier prêt à l'emploi présentent en principe des résistances à la compression plus élevées (50 à 90 MPa) que les éléments en béton conventionnel (30 à 45 MPa). La résistance à la flexion représente environ 10 à 15 % de la résistance à la compression. Les pièces imprimées soumises à la flexion ou à la traction doivent donc être renforcées par des armatures qui sont difficilement intégrables dans le processus d'impression (voir § 5.3, p. 26).

<sup>(7)</sup> Cas particulier d'anisotropie. Un matériau est orthotrope s'il possède trois plans de symétrie orthogonaux entre eux. Ses propriétés mécaniques sont différentes et indépendantes dans trois directions perpendiculaires les unes aux autres.

# 7. Les machines d'impression au service de la construction 3D

La machine d'impression a pour fonction principale de guider la tête d'impression selon des consignes programmées dans un logiciel de pilotage (trajectoire, précision et vitesse d'impression définies). En général, un silo à matière sèche et une pompe à mortier complètent le dispositif. Pour rappel, il existe trois types de machines d'impression par extrusion (voir aussi § 3.1, p. 11) : machines à portique, à leviers et à bras robotisé.

Aujourd'hui, ces imprimantes se déclinent en plusieurs tailles :

- petites machines. Spécialement conçues pour des travaux en laboratoire (voir figure 40, p. 43), elles permettent d'imprimer des éléments de quelques centimètres et remplissent principalement des fonctions pédagogiques et scientifiques (pour développer des compositions imprimables ou tester certains paramètres machine, p. ex.)
- grandes machines. Elles sont dédiées à l'impression à grande échelle en usine ou sur chantier. Dans ce dernier cas, l'imprimante doit être transportable et relativement facile à monter et démonter.

En ce qui concerne l'impression à grande échelle, le marché propose un certain nombre de machines dont le choix dépend essentiellement des applications, de leur mobilité sur chantier, de leur portée d'impression et de la complexité des géométries à imprimer.

Une sélection de machines utilisées dans la construction 3D est présentée dans le tableau 4. Outre celles-ci (fabriquées par Concrenetics, CyBe Construction, Constructions-3D, WASP, COBOD et Apis Cor), d'autres fabricants tels que BetAbram, Batiprint3D, MudBots 3D Concrete Printer, BAAM, AMT, XtreeE, Vertico ou ICON, proposent des machines pour l'impression 3D du béton.

**Tableau 4** Exemples de machines d'impression 3D par extrusion et principales caractéristiques.

Société (pays)	Machine	Type	Surface (volume) d'impression	Matériaux compatibles	Vitesse maximale de déplacement de la tête d'impression [mm/s]	Applications
Concrenetics (Belgique)	One-X	Bras robotisé à 6 axes	Portée 3,2 m et volume d'impression 2,4 x 2,4 x 3,0 m <sup>3</sup>	Prémix imprimable Cantillana et autres mortiers	600	Éléments préfabriqués (mobilier urbain, p. ex.)
CyBe Construction (Pays-Bas)	G	Portique	7 (longueur) x 10 (largeur) x 4 (hauteur) m <sup>3</sup>	Prémix imprimable CyBe Construction (CyBe MORTAR) et autres mortiers	250	Éléments préfabriqués plutôt grands (maison, p. ex.)
	GR	Portique	7 (longueur) x 10 (largeur) x 4 (hauteur) m <sup>3</sup>			Impression sur site d'éléments plutôt grands (maison, p. ex.)
	R	Bras robotisé à 6 axes	2,65 m (circonférence) x 3,2 m (hauteur)		500	Éléments préfabriqués plutôt petits (mobilier urbain, p. ex.)
	RC	Bras robotisé à 6 axes	5 m (circonférence) x 3,2 m (hauteur)			Impression sur site d'éléments plutôt petits (mobilier urbain ou petits locaux, p. ex.)
	RT	Bras robotisé à 6 axes	5 (longueur minimale) x 2,5 (largeur) x 4 (hauteur) m <sup>3</sup>			Éléments préfabriqués plutôt petits (mobilier urbain, p. ex.)
Constructions-3D (France)	Maxi Printer	Bras télescopique à 4 axes	10 m (hauteur) et 9,5 m (longueur du bras/rayon)	Mortier	300	Maisons et structures <i>in situ</i>
WASP (Italie)	Big Delta	Delta	12 m (hauteur) x 6 m (circonférence)	Matériaux naturels et cimentaires	400	Maisons et structures <i>in situ</i>
Cobod (Danemark)	BOD2	Portique	49,4 (longueur maximale) x 14,6 (largeur) x 8,1 (hauteur) m <sup>3</sup>	Matériaux cimentaires : mortier et micro béton (D <sub>max</sub> = 10 mm)	1000	Maisons et structures <i>in situ</i>
Apis Cor (États-Unis)	Frank	Grue	3,2 m (hauteur) et 5,5 m (rayon)	Mortier	333	Maisons et structures <i>in situ</i>

## Concrenetics : *One-X Industry*

La société belge Concrenetics a développé une machine qui permet d'imprimer en usine des éléments préfabriqués tels que des pièces pour le mobilier urbain (voir figure 42). Il s'agit d'un bras robotisé à six axes (ABB IRB6700) d'une portée de 3,2 mètres et intégré au système *One-X*. Celui-ci se compose d'un silo, qui peut stocker jusqu'à 1 200 kilos de matériau sec (mélange imprimable) et permet donc de produire jusqu'à 600 litres de mortier imprimé, d'une pompe à mortier, d'un bras robotisé et d'une tête d'impression. La tête est équipée d'un mélangeur dynamique et offre la possibilité d'ajouter un adjuvant (accélérateur de prise) juste avant l'extrusion. Le système est doté d'une barrière de contrôle d'accès pour travailler en toute sécurité. Le volume d'impression est de 2,4 x 2,4 x 3,0 m<sup>3</sup>. Une extension de rail est disponible en option pour augmenter les capacités du système (zone d'impression plus large).



Fig. 42 Système *One-X Industry* (gauche) et exemple d'une pièce imprimée avec ce système chez Buildwise (droite).

## CyBe Construction : systèmes *G, GR, R, RC* et *RT*

La société néerlandaise CyBe Construction propose des imprimantes de différents types : portique (*G* et *GR*) et bras robotisé (*R, RC* et *RT*) (voir figures 43a, 43b (p. 47), et 43c (p. 47)). Les imprimantes à portique et l'imprimante *R* sont fixes. Les imprimantes robotisées disposent de bras robotisés à six axes (ABB). Les modèles baptisés *RC* et *RT* sont mobiles car ils sont respectivement placés sur des chenilles (*RC*) ou sur un rail (*RT*), ce qui facilite leur déplacement d'un site de construction à l'autre. Par ailleurs, CyBe Construction a développé le *CyBe MORTAR*, un mélange spécial adapté à leurs imprimantes, ce qui n'empêche pas leurs machines d'être compatibles avec d'autres mortiers.

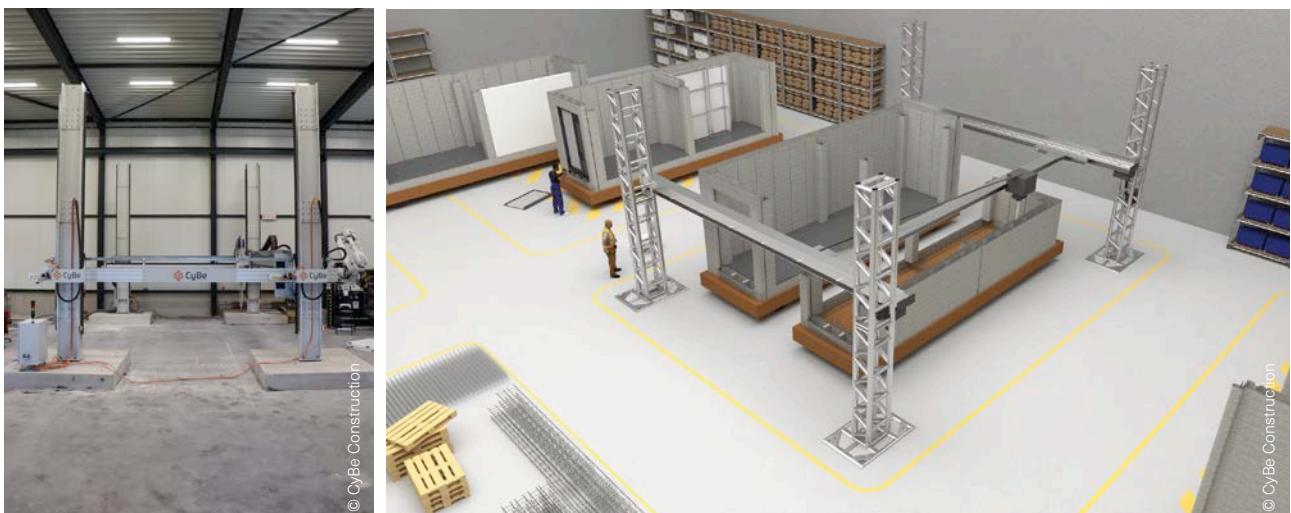
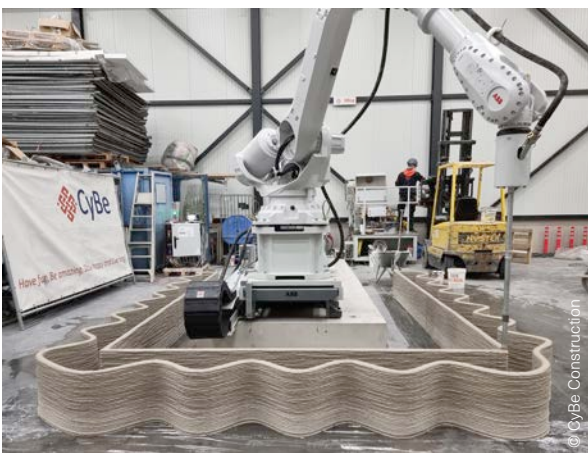


Fig. 43a Imprimantes *CyBe G* (Gantry) et *CyBe GR* (Gantry Robot) de CyBe Construction – <https://cybe.eu/>.



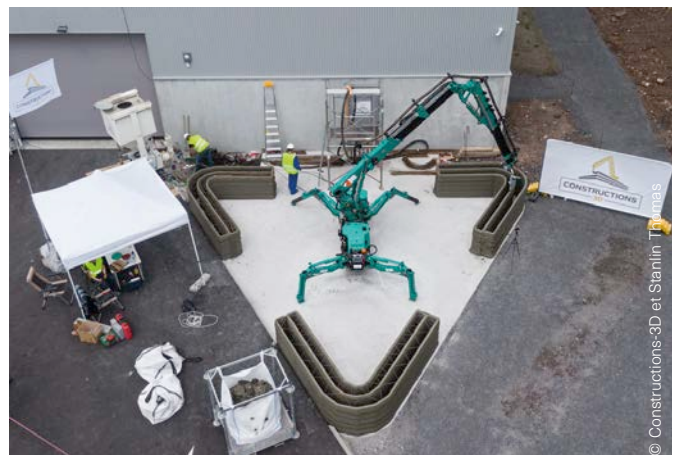
**Fig. 43b** Imprimantes *CyBe R (Robot)* et *CyBe RC (Robot Crawler)* de CyBe Construction – <https://cybe.eu/>.



**Fig. 43c** Imprimante *CyBe RT (Robot Track)* et exemple d'une structure imprimée aux Pays-Bas par le robot *CyBe RC* – <https://cybe.eu/>.

### Constructions-3D : *Maxi Printer*

L'imprimante 3D *Maxi Printer* a été conçue par la société française Constructions-3D (voir figure 44). Il s'agit d'une imprimante à grande échelle composée d'un bras télescopique à quatre axes et optimisée pour être déployée sur chantier. Pour des travaux de recherche et développement, la société propose une machine plus petite, baptisée *Mini Printer*. Elle permet d'imprimer des éléments de construction de dimensions allant jusqu'à 66 x 52 x 70 cm<sup>3</sup>.



**Fig. 44** : Machine d'impression *Maxi Printer* développée par Constructions-3D.

## WASP : *Big Delta*

La société italienne WASP (*World's Advanced Saving Project*) a dévoilé deux machines d'impression à grande échelle : *Crane* (voir § 4.2, p. 18 et figure 16, p. 20) et *Big Delta*. La *Big Delta* est une machine d'impression de 12 mètres de haut et de six mètres de circonférence (voir figure 45). Elle ressemble à un grand échafaudage soutenant une tête d'impression en son centre. Le robot a une extrémité mobile guidée par trois parallélogrammes et les moteurs sont fixés sur le cadre. C'est une différence majeure par rapport aux robots sériels classiques, où les moteurs d'entraînement de chaque articulation se déplacent avec elle, ajoutant une inertie importante au mouvement. Dans le cas de la *Big Delta*, les moteurs fixés au cadre allègent la partie mobile. Elle peut ainsi se déplacer avec des moteurs moins puissants. Bien que la machine ait été conçue pour imprimer à partir de ressources naturelles disponibles localement telles que l'argile et la boue, elle est aussi compatible avec les matériaux cimentaires.



Fig. 45 Imprimante 3D *Big Delta*.

## COBOD : *BOD2*

COBOD, une société danoise, a dévoilé dernièrement la *BOD2*, une version améliorée de l'imprimante *BOD1*. Il s'agit d'une imprimante à portique spécialement conçue pour l'impression sur site (voir figure 46). Le système peut être étendu dans n'importe quelle direction avec des modules, jusqu'à un maximum de 49,4 mètres de long, 14,6 mètres de large et 8,1 mètres de haut. Kamp C, le Centre provincial pour le développement durable et l'innovation dans la construction, a utilisé cette machine afin d'imprimer une maison à deux étages à Westerlo.



Fig. 46 Imprimante *BOD2* (gauche) et maison imprimée par la *BOD2* chez Kamp C (droite).



## Apis Cor : *Frank*

La startup américaine Apis Cor a développé une imprimante mobile appelée *Frank* qui permet d'imprimer des maisons *in situ* (voir figure 47). Il s'agit d'une imprimante portable et livrable sur chantier. La machine ressemble à une grue montée sur une plateforme mobile (chenille). Elle est dotée d'un bras amovible qui peut atteindre une hauteur maximale de 3,2 mètres et un rayon d'impression de 5,5 mètres. Pour imprimer des bâtiments plus hauts, il est possible de déplacer la machine à un étage supérieur ou de l'installer sur une plateforme surélevée.



**Fig. 47** Imprimante *Frank* développée par Apis Cor.

# 8. Exemples de domaines d'application

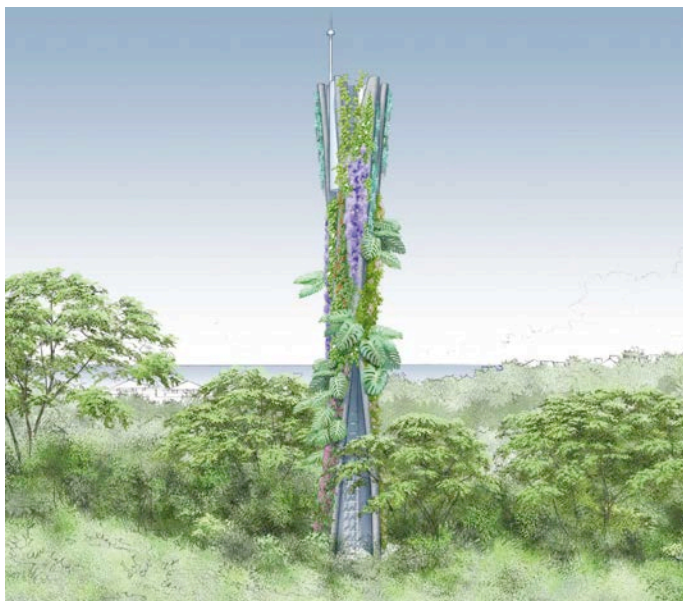
De nombreux projets et réalisations ont montré l'étendue des applications possibles de l'impression 3D par extrusion de matériaux cimentaires dans le domaine de la construction. Le développement d'imprimantes 3D à grande échelle a permis l'impression de structures grandeur nature. Jusqu'à présent, à l'exception de quelques applications structurales, les domaines d'application courants dans la construction 3D concernent des réalisations non structurales. Certains projets tels que les maisons et les bureaux de petite ou moyenne taille peuvent être imprimés sur site à l'aide d'imprimantes transportables (voir chapitre 7, p. 45). D'autres projets tels que le mobilier urbain, les escaliers et les éléments de façade sont imprimés en usine dans un environnement contrôlé (éléments préfabriqués) avant d'être posés ou assemblés sur site. Outre la structure des maisons (murs extérieurs et intérieurs), déjà bien mise en avant dans les chapitres précédents, ce document propose une sélection de quelques éléments ou ouvrages imprimés en 3D afin d'illustrer l'utilisation à grande échelle de cette technologie innovante. Les exemples sont divisés en trois catégories :

- coffrages permanents
- applications non structurales (ouvrages enterrés, mobilier urbain, éléments de façade, récifs artificiels, etc.)
- applications structurales (murs porteurs, passerelles, escaliers, socles d'éoliennes, etc.).

## 8.1 Coffrages permanents

Les pièces d'impression 3D en mortier peuvent servir de coffrage pour ferrailer et couler du béton à l'intérieur. Elles font donc partie intégrante de la structure en tant que coffrage permanent.

Cette technique peut s'appliquer aux pylônes, comme ceux qui permettent de soutenir les antennes de télécommunication, généralement fabriqués en acier. Un pylône de 12 mètres de haut en forme d'arbre a ainsi été réalisé par impression et assemblage de six coffrages de voussoirs de deux mètres chacun (voir figure 48). Les voussoirs seront végétalisés afin de se fondre dans le paysage. Pour former l'ensemble de la structure, les différents modules imprimés en usine sont empilés les uns sur les autres. Le tout est maintenu par des câbles en acier qui sont introduits dans des gaines scellées au moyen d'un coulis de béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et tendus au maximum par des vérins. Le coffrage permanent reste en place et agit comme une peau protectrice pour le béton coulé à l'intérieur.



© Art&Fact Innovation, XtreeE, Lamoureux, Ricciotti Ingénierie, LafargeHolcim, Jardins de Babylone, Freyssinet.

**Fig. 48** Pylône de 12 mètres réalisé par impression et assemblage de six coffrages de voussoirs.

La figure 49 montre un exemple de moules de poteaux extérieurs, exposés sur la façade de la maison YRYS à Alençon (France). Ceux-ci ont été imprimés en usine, transportés sur site puis remplis d'un BFUP pour assurer leur fonction structurale.



© Maison France Confort, LafargeHolcim, XtreeE, Coste Architecture, Fehr Architectural.

Fig. 49 Moules des poteaux extérieurs imprimés en 3D.

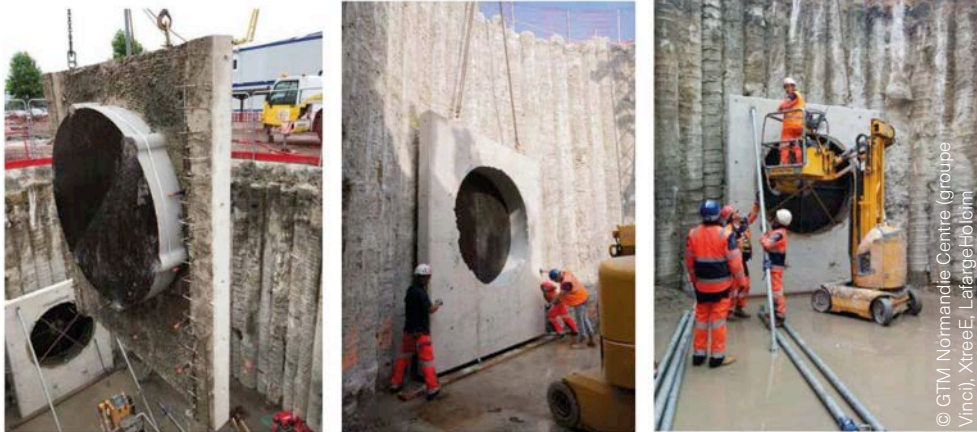
## 8.2 Applications non structurales

En partenariat avec Point P Travaux Publics et la Sade, XtreeE a développé des ouvrages souterrains en impression 3D de mortier. Il s'agit d'un déversoir d'orage (voir figure 50) et de regards de visite. Les éléments ont été imprimés dans les ateliers de XtreeE, puis transportés et installés sur site. À Rouen (France), en partenariat avec GTM Normandie Centre, XtreeE a imprimé en mortier une cloche de démarrage de tunnelier, traditionnellement réalisée en métal (voir figure 51, p. 52). La cloche elle-même est fabriquée en partie en usine et en partie par coulage *in situ*. Un anneau à l'exacte géométrie est imprimé avec des réservations, ou oreilles, pour y couler un béton armé et assurer son encastrement dans un voile préfabriqué. Ce voile est ensuite placé dans sa position définitive et un coulage est réalisé pour s'adapter aux parois excavées.



© Métropole européenne de Lille (MEL), Point P TP (groupe Saint-Gobain), XtreeE, Artelia, SADE (groupe Veolia), LafargeHolcim.

Fig. 50 Déversoir d'orage installé à La Madeleine à Lille (France).



**Fig. 51** Cloche de démarrage de tunnelier à Rouen (France).

L'une des applications d'impression 3D les plus populaires reste la fabrication de meubles, de décorations de formes complexes et de mobilier urbain. Des exemples d'éléments imprimés en usine et placés à l'intérieur de bâtiments sont illustrés aux figures 52a et 52b (p. 53).

D'autres exemples d'éléments imprimés en 3D et placés à l'extérieur dans des lieux publics sont illustrés aux figures 53a (p. 53) et 53b (p. 54).



**Fig. 52a** Comptoir d'accueil.



**Fig. 52b** Pièces imprimées par Buildwise et installées dans son bâtiment à Zaventem. Cache-pot de 1,1 mètre de diamètre (gauche) et pied de table (droite).

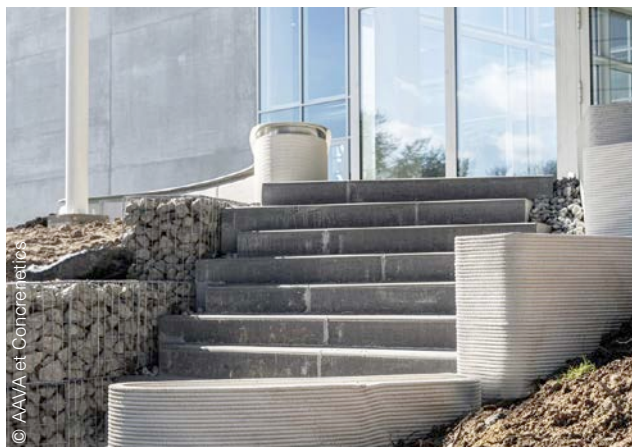
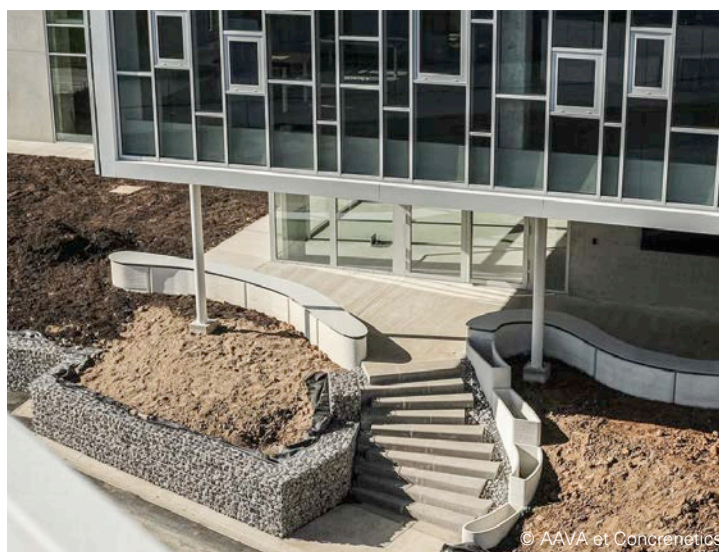


**Fig. 53a** Exemples de mobiliers urbains et d'éléments décoratifs imprimés en 3D. Pots urbains (A), potager (B), bacs de plantation et bancs urbains (C) et table de pique-nique (D).



**Fig. 53b** Exemples de mobiliers urbains et d'éléments décoratifs imprimés en 3D.

Pour les abords d'un nouveau bâtiment de démonstration dédié à encourager l'adoption des technologies numériques par le secteur de la construction, Buildwise a voulu créer des espaces en connexion avec la nature à travers des formes organiques modernes. Seize éléments en mortier, dont certains ont été imprimés chez Buildwise et d'autres chez Concrenetics, encadrent l'escalier extérieur du bâtiment (voir figure 54). Le design a été réalisé par le bureau d'architecture AAVA. Ces éléments creux servent de bacs de plantation et de bancs.



**Fig. 54** Eléments encadrant l'escalier extérieur du nouveau bâtiment de Buildwise à Limelette.

Les éléments de façade constituent d'autres exemples d'ouvrages non structuraux imprimés en 3D. BESIX 3D a imprimé la façade de l'extension de son siège à Dubaï. La façade se compose de 290 panneaux imprimés dans un laboratoire et assemblés sur site (voir figure 55).

Un autre projet, piloté par l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), avait pour objectif d'offrir des nurseries artificielles aux poissons dans le port de Toulon (France). Des herbiers artificiels (posidonie imitée en polypropylène) sont placés sur des blocs de mortier imprimés en 3D par la société française Seaboost. Les blocs font office de cavités pour abriter les petits poissons et restaurer la biodiversité dans les zones maritimes aménagées. Outre ces nurseries, Seaboost a inauguré, dans le cadre du projet Récif'Lab, des récifs 3D artificiels biomimétiques immergés au large de la côte agathoise (France) pour encourager la restauration écologique et la reconquête de la biodiversité marine (voir figure 56). Le mélange 3D de Vicat et la technologie d'impression 3D de XtreeE ont permis de concrétiser ce projet.

Enfin, un projet de recherche mené par l'Université de Gand, la société de construction BESIX, la startup ResourceFull et le bureau d'ingénierie Witteveen+Bos, porte sur le développement de mélanges de béton durables adaptés à l'impression de blocs de brise-lames. L'avantage principal de l'impression *in situ* de ces éléments est la réduction de la majeure partie des coûts liés aux ressources logistiques nécessaires pour les déplacer de leur site de production jusqu'au chantier. En outre, l'impression 3D permet de réaliser un brise-lames sur mesure, aux formes plus complexes et optimisées en fonction de la configuration des vagues locales et des courants marins. Le plus grand défi réside dans la durabilité des éléments en milieu salin.

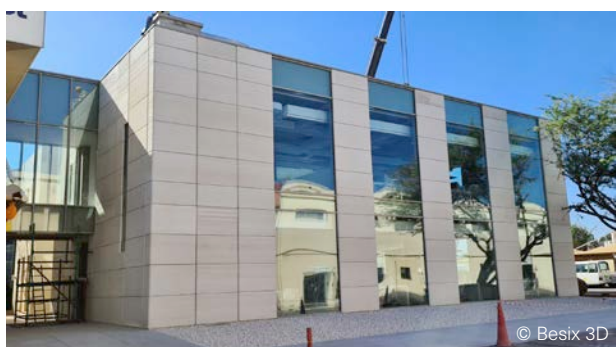


Fig. 55 Façade en mortier imprimée en 3D.



Fig. 56 Récifs en mortier conçus par l'impression 3D au large d'Agde (France).

## 8.3 Applications structurales

Dans le cadre du projet de recherche universitaire Démocrite, initié par la société française XtreeE, un mur porteur de 1,6 mètre de haut et un élément générique aux performances structurales et acoustiques ont été imprimés en utilisant du béton à hautes performances (voir figure 57, p. 56). Le mur présente une structure interne en double sinusoïde : la première, sur un axe transversal, rappelle celle d'un panneau sandwich. La seconde, qui suit l'axe vertical, réduit les ponts thermiques en limitant les points de contact.



© Clément GOSSELIN : diplôme 2015 ENSAPM Digital Knowledge, en collaboration avec Philippe ROUX, Romain DUBALLET et Nadja GAUDILLIERE. Philippe MOREL et Jean Aimé SHU. Projet Démocrite, EZCT Architecture & Design Research, Lafarge, PIMM, ENSAM, HAL, Nicolas Lecoq, XtreeE.

**Fig. 57** Eléments en béton à hautes performances imprimés en 3D.

Des murs de soutènement adaptés aux contours naturels existants ont été imprimés en usine par la société néerlandaise Twente Additive Manufacturing, puis transportés sur site (voir figure 58).



**Fig. 58** Murs de soutènement imprimés en 3D.

Une passerelle pour piétons et cyclistes a été imprimée en 3D et mise en service à Nimègue (Pays-Bas) (voir figure 59, p. 57). Ce projet est le fruit d'une collaboration entre Witteveen+Bos, l'Université de technologie d'Eindhoven (Pays-Bas), le ministère néerlandais de l'Infrastructure et de la Gestion de l'eau et le designer Michiel van der Kley. Le pont mesure 29 mètres de long et est constitué de 30 pièces imprimées dans le centre d'impression 3D de Saint-Gobain Weber Beamix. Celles-ci ont été ensuite assemblées sur place et maintenues ensemble au moyen de câbles en acier. Il ne s'agit pas de couches pleines et uniformes de matériau, mais de structures maillées. Le design s'appuie sur un logiciel de conception paramétrique (création d'un modèle à partir duquel plusieurs paramètres peuvent être modifiés) qui permet notamment d'optimiser le matériau et le temps d'impression en fonction des charges appliquées (circulation, poids, etc.).

À l'instar des ponts, une tendance particulière semble se dégager pour les escaliers imprimés en 3D. La texture de surface (présence de strates), inhérente au procédé d'impression 3D par extrusion, constitue un antidérapant naturel qui limite ainsi le risque de chute. BAM Infra Nederland a installé un escalier imprimé en 3D aux Pays-Bas (voir figure 60, p. 57). Ce projet a été réalisé en collaboration avec Saint-Gobain Weber Beamix, Bekaert et la société d'ingénierie de construction néerlandaise Witteveen+Bos. Il s'agit d'escaliers déposés sur un talus, pour lesquels la conception paramétrique semble particulièrement bien adaptée. Ainsi, la Business Unit Impression 3D de Saint-Gobain Weber propose un nouvel outil numérique qui permet aux clients de concevoir eux-mêmes des escaliers sur mesure. Ceux-ci peuvent être reproduits précisément et



construits sur n'importe quel environnement naturel en pente. L'utilisation de la modélisation paramétrique dans ce cas pourrait conduire à une adoption plus large de cet outil dans la construction additive.

Un autre exemple est l'escalier imprimé par la société néerlandaise Twente Additive Manufacturing (voir figure 61).



Fig. 59 Passerelle de Nimègue (Pays-Bas) imprimée en 3D.

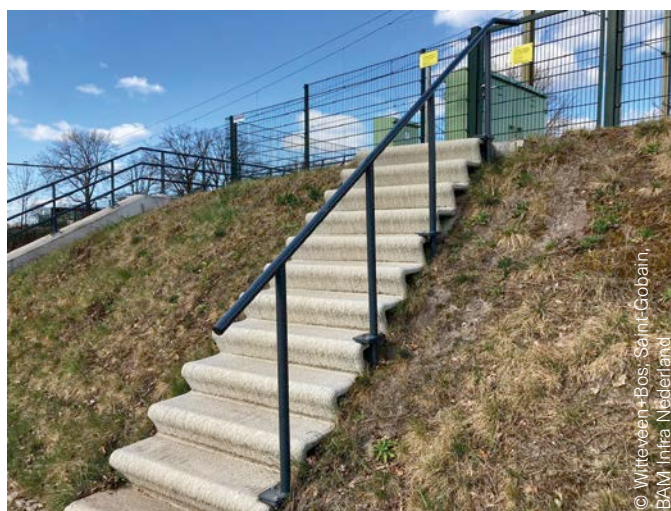


Fig. 60 Escalier imprimé en mortier.

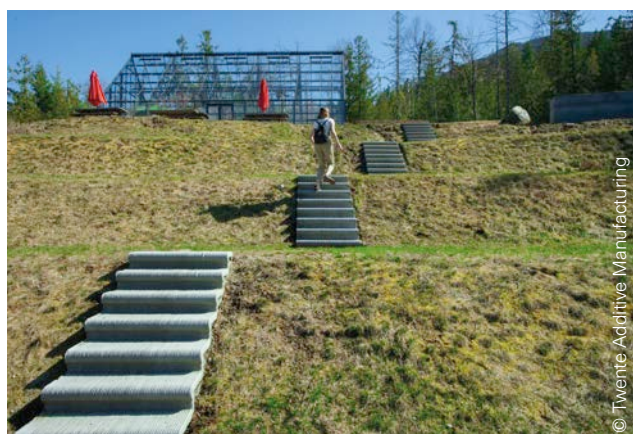


Fig. 61 Escalier imprimé en mortier.

Le Malawi souffre depuis longtemps d'un manque cruel d'établissements scolaires. Dans le cadre de son projet commun avec 14Trees, une coentreprise entre Holcim et le groupe CDC, l'entreprise danoise COBOD a imprimé *in situ* la structure d'une école grâce à son imprimante 3D BOD2 (voir figure 62). Le bâtiment final offre une superficie de 56 m<sup>2</sup>.

Enfin, les bases des éoliennes étant généralement transportées par la route, elles ne peuvent pas dépasser 4,5 mètres, ce qui limite la hauteur des tours de turbine à moins de 100 mètres. L'impression sur place de bases optimisées pour les éoliennes devrait permettre de construire des tours de 150 à 200 mètres de haut afin de capter des vents plus forts et augmenter ainsi leur rendement. Actuellement, une turbine de cinq mégawatts à 80 mètres génère chaque année 15,1 GWh. La même turbine à 160 mètres produirait 20,2 GWh, soit 33 % de production supplémentaire. Le prototype d'une base de dix mètres de haut a été imprimé à Copenhague (Danemark) (voir figure 63).



Fig. 62 École construite par l'impression 3D au Malawi.



Fig. 63 Base pour éolienne imprimée en 3D.

# 9. Conformité et propriété intellectuelle dans l'impression 3D

## 9.1 Mise sur le marché et conformité

Le marquage CE apposé sur des produits de construction indique qu'ils ont été évalués et que le fabricant a établi une déclaration de performance. Celle-ci permet aux États membres de vérifier si les performances du produit satisfont aux critères réglementaires qu'ils ont spécifiés pour les ouvrages de construction. Ce marquage est obligatoire pour la mise sur le marché et la libre circulation d'un produit de construction au sein de l'Union européenne. L'élaboration des règles techniques relatives à ces produits a conduit à l'instauration de normes harmonisées comprenant une annexe ZA relative au marquage CE (voir site Internet du [CEN](#)). Pour les produits non couverts ou s'écartant des normes harmonisées, à savoir la plupart des produits et des kits innovants, uniques ou complexes, les fabricants peuvent demander une évaluation technique européenne (voir sites Internet de l'[EOTA](#) et de l'[UBAtc](#)).

En effet, tout produit manufacturé déjà couvert par une norme harmonisée (la norme NBN EN 197-1 [B9] pour les ciments, p. ex.) doit afficher le marquage CE lors de sa mise sur le marché. Néanmoins, c'est rarement le cas pour des produits innovants qui n'ont pas encore eu le temps de faire leurs preuves. Étant donné qu'ils s'écartent des produits traditionnels, leur utilisation dans les systèmes de construction n'est généralement pas documentée. Par exemple, le prémix imprimable est un produit non couvert par une norme. Si le fabricant souhaite commercialiser son matériau dans un ou plusieurs États membres de l'Union européenne, il peut entreprendre les démarches pour obtenir une Évaluation technique européenne<sup>(8)</sup> (ETE). L'ETE, délivrée par un organisme d'évaluation technique, permet d'obtenir le marquage CE des produits innovants. Elle comprend les performances du produit correspondant aux caractéristiques essentielles convenues entre le fabricant et l'organisme d'évaluation technique pour l'usage prévu, ainsi que les détails techniques nécessaires pour la mise en œuvre du système d'évaluation et de vérification de la constance des performances. Les caractéristiques essentielles font l'objet d'une *Declaration of Performance* (DoP) et vont permettre d'apposer le marquage CE sur le produit.

Ainsi, les produits préfabriqués couverts par une norme européenne harmonisée doivent porter le marquage CE. Pour ce qui est des produits préfabriqués en béton, les premiers à porter ce marquage étaient les clôtures en béton. Néanmoins, le marquage CE de ce produit s'appuie sur une simple déclaration du fabricant sans intervention d'un organisme notifié. La norme NBN EN 13369 [B7], intitulée 'Règles communes pour les produits préfabriqués en béton', précise les exigences relatives aux constituants et au béton ainsi que les conditions générales d'application des Eurocodes pour le dimensionnement des produits préfabriqués en béton. Les règles communes servent également de texte de référence pour les produits non couverts par des normes ou des Agréments techniques européens. Cependant, cette norme ne s'applique pas aux pièces préfabriquées en usine par l'impression 3D puisque le mélange n'est pas conforme à la norme NBN EN 206 [B14].

En Belgique, le label BENOR est une marque de qualité volontaire attribuée à un matériau de construction conforme aux exigences des normes et des prescriptions techniques belges. Par exemple, un béton prêt à l'emploi conforme aux normes NBN EN 206 [B14] et NBN B 15-001 [B3] peut être porteur du label BENOR. Dans le domaine de la construction, cette marque est gérée par les organismes de certification regroupés au sein du BUCP (*Belgian Union of Certification and Attestation Bodies for Construction Products*). En ce qui concerne l'impression 3D, le matériau imprimable n'est pas couvert par la norme NBN B 15-001 [B3] et le label BENOR ne peut donc pas être apposé sur ce produit. Dans tel cas, le label ATG (Agrément technique) peut constituer une alternative. Il indique la conformité à un agrément technique d'un produit innovant ou s'écartant des normes. L'ATG est géré par l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc). Il importe de savoir que l'ATG n'est valable que pour un produit de construction bien déterminé, d'un fabricant bien déterminé et pour une durée bien déterminée.

<sup>(8)</sup> En Belgique, l'abréviation ETA (*European Technical Assessment*) est généralement utilisée à la place de ETE (Évaluation Technique Européenne).

La France propose aussi une Appréciation technique d'expérimentation (ATEX). Il s'agit d'une procédure rapide d'évaluation technique menée par un groupe d'experts sur tout produit ou procédé innovant. Toutefois, l'ATEX est seulement valable pour un (ou plusieurs) chantier expérimental particulier. Un exemple récent est l'ATEX délivrée par le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) pour le projet Viliaprint à Reims (France). Il s'agit d'un projet de construction de cinq maisons combinant l'impression 3D du béton hors site et des éléments préfabriqués (voir aussi § 5.6, p. 35). La Belgique ne dispose pas d'un système équivalent à l'ATEX.

En résumé, le marquage CE concerne la mise sur le marché des produits de construction, c'est-à-dire l'instrument que les fabricants utilisent pour garantir leurs produits auprès des autres États membres. Les labels ATG et BENOR ainsi que l'ATEX concernent l'acceptation par le marché sans influencer la mise sur le marché. Autrement dit, ces instruments sont destinés à convaincre les acteurs du secteur (architectes, prescripteurs, entrepreneurs, investisseurs, etc.) que les produits sont aptes à l'usage auquel ils sont dédiés, qu'ils sont fiables et que leurs propriétés et performances satisfont aux exigences.

## 9.2 Brevets

Un brevet confère des droits exclusifs à son titulaire (un inventeur ou une entreprise) sur son invention, ce qui signifie qu'il peut empêcher quiconque de l'utiliser, de la fabriquer ou de la vendre sans son autorisation. Une analyse des demandes de brevet déposées dans le domaine de l'impression 3D permet d'obtenir un aperçu de l'évolution de cette technologie. Les brevets sont classés suivant des systèmes de classification. Trouver des brevets pour des développements technologiques concrets dans le domaine de l'impression 3D implique de sélectionner et combiner les bonnes classifications qui fourniront les résultats les plus pertinents (<https://worldwide.espacenet.com>). À titre d'exemple, l'analyse sur les matériaux pour la fabrication additive dans le domaine de la construction pourrait être réalisée par combinaison des deux classifications CPC B33Y70/00 **Materials specially adapted for additive manufacturing** et E04 **General building constructions**. D'autres classifications peuvent être appliquées pour trouver d'autres innovations, comme des mélanges de ciment spécialement adaptés pour l'impression 3D, des additifs, etc.

Une recherche plus générale, réalisée par la Cellule Brevets de Buildwise (OCBC), combinant les deux classifications CPC B33Y **Additive manufacturing technologies** et E04 **General building constructions**, donne 385 résultats entre 2002 et 2020 (voir figure 64). L'analyse des années de dépôt des brevets sélectionnés révèle que le nombre de brevets dans le domaine de la construction 3D ne cesse de croître depuis 2013. En toute logique, les années à venir devraient donc être marquées par un nombre élevé de demandes de brevet. Précisons que la procédure de dépôt d'un brevet dure 18 mois, ce qui explique pourquoi le graphique ne reprend pas les années 2021 et 2022.

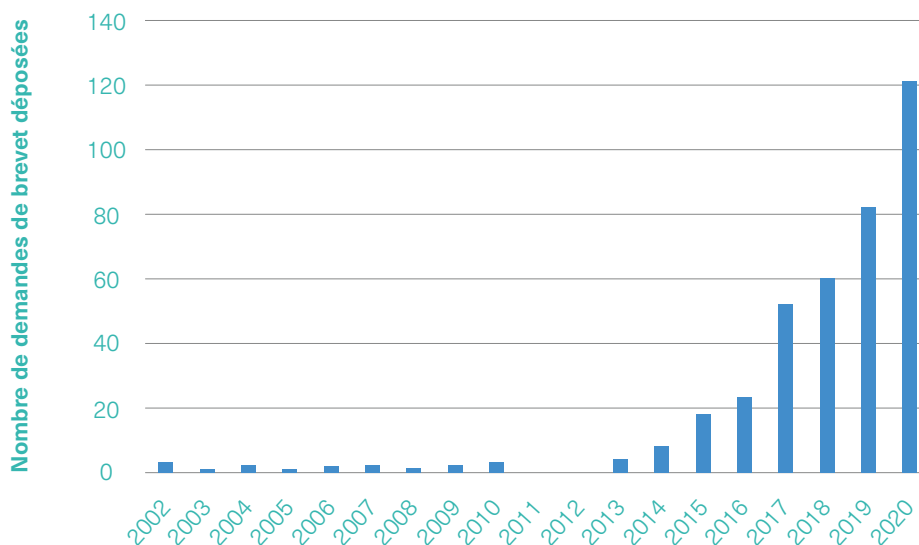


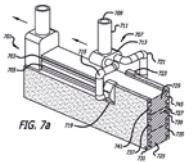
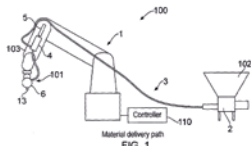
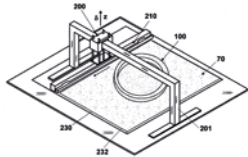


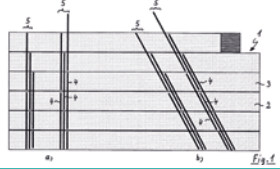
Fig. 64 Nombre de demandes de brevet déposées entre 2002 et 2020 dans le domaine de la construction 3D.

Les brevets relatifs à l'impression 3D dans le domaine de la construction appartiennent généralement à l'une des sous-catégories suivantes :

- le matériau
- la technique d'impression 3D
- le renforcement.

Quelques exemples de brevets, choisis aléatoirement dans la liste précitée, sont présentés au tableau 5.

**Tableau 5** Exemples de demandes de brevet déposées dans l'impression 3D.

Numéro du brevet	Description	
<b>MATÉRIAU</b>		
<b>EP4151409 A1</b>	Des compositions de mortiers imprimables sont décrites dans cette demande de brevet déposée par Holcim.	
<b>WO 2020/021202 A1</b>	Nouvelle composition de ciment brevetée par Vicat pour le béton d'impression 3D (voir § 6.2, p. 38)	
<b>EP3738941 A1</b>	Élément de construction composite produit par une technique de fabrication additive par extrusion (ETH Zürich)	
<b>TECHNIQUE D'IMPRESSIION</b>		
<b>US 2010/0257792 A1</b>		Contour Crafting (voir chapitre 2, p. 8)
<b>EP 2773492 B1</b>		Procédé de construction multicouche par extrusion d'un matériau cimentaire à travers une buse
<b>WO 2011/021080 A2</b>		Procédé de réalisation d'une structure par dépôt de matière granulaire et d'un agent liant, et compression au moyen de rouleaux ( <i>selective binding</i> ) (voir § 3.2, p. 13)
<b>EP 3501769 A1</b>		Procédé de fabrication automatisé faisant appel à un coffrage glissant ( <i>slip forming</i> ) (voir chapitre 3, p. 11)
<b>RENFORCEMENT</b>		
<b>WO 2021/175580 A1</b>		Tête d'impression équipée d'un système de dépôt du fil de renforcement pendant le processus d'impression (voir § 5.3.1, p. 26)
<b>WO 2019/092178 A1</b>		Renforcement de structures imprimées en 3D par ajout de barres à travers différentes couches de béton (voir § 5.3.3, p. 31)

# 10. Conclusions et perspectives

Ces dernières années, des projets d'impression 3D du béton ont vu le jour partout dans le monde. Ils ont permis de réaliser des maisons unifamiliales dont certaines sont désormais habitées. En Belgique, un projet pilote, inauguré en 2020, a été mené par Kamp C en collaboration avec Buildwise. Toute l'ossature de cette maison (RDC+1) ainsi qu'une partie du mobilier ont été imprimées entièrement en mortier, un bel exemple du potentiel de la technologie disponible à ce jour.

L'intérêt pour l'impression 3D est grandissant, aussi bien de la part des architectes que des fabricants et des entrepreneurs. Cette technologie pourrait en effet répondre à certains grands défis du secteur : réalisation économique de structures de forme complexe, gain de temps de réalisation, réduction de la consommation en matières premières, meilleure gestion des déchets, diminution de la pénibilité, etc. À l'heure actuelle, l'impression 3D permet une meilleure rationalisation des processus constructifs qui sont, pour le gros œuvre, intégralement automatisés grâce à la numérisation, au pilotage de la fabrication (gérée par un modèle numérique) et à la robotique.

L'impression 3D pourrait rapidement prendre le pas sur les méthodes plus conventionnelles pour certaines applications dont, entre autres, le mobilier urbain, les balcons, les escaliers, les murs courbes, les vousoirs de passerelle, certains ouvrages enterrés ou encore la réalisation de coffrages permanents. La technologie n'est pas encore tout à fait prête pour des réalisations sur chantier soumises à des aléas météorologiques. Notons par contre que des éléments peuvent être imprimés en usine dans un environnement contrôlé avant d'être assemblés sur site.

De plus en plus technologiquement abouties, les imprimantes 3D pourraient, à terme, limiter la main-d'œuvre pour les tâches pénibles et répétitives sur les chantiers tout en ouvrant un nouveau panel de projets économiquement viables et architecturalement innovants. Une audace renouvelée pour notre secteur !

Cependant, si des prototypes ont pu voir le jour, la phase d'industrialisation est encore loin. La principale préoccupation consiste à savoir si la résistance des structures imprimées en 3D est homogène et durable en fonction de l'environnement extérieur. Par ailleurs, il reste encore de nombreux défis à relever avant que la technologie ne soit utilisée dans la fabrication d'éléments structuraux. Le plus grand réside dans le renforcement par armatures, notamment pour la réalisation de bâtiments multiétagés. En effet, les pièces qui sont imprimées en mortier ont montré des résistances élevées à la compression, mais celles qui sont soumises à la flexion ou à la traction doivent être renforcées par des armatures difficilement intégrables dans le processus d'impression. De nombreuses approches, allant du renforcement manuel au renforcement automatisé, font néanmoins l'objet de plus amples recherches.

Peu d'études économiques fiables et indépendantes soulèvent la question des coûts. Toutefois, il semble évident que les éléments imprimés en 3D ne constituent pas toujours une option plus économique que les éléments fabriqués selon une méthode traditionnelle (*in situ* ou préfabrication). Dans certains cas, comme pour des murs droits pouvant être réalisés en maçonnerie, l'utilisation de l'impression 3D pour la construction reste à priori plus coûteuse (investissements, matières premières, etc.) que les approches classiques. Cependant, pour d'autres applications telles qu'un escalier sur mesure déposé sur un talus ou des murs courbes, elle pourrait représenter une solution innovante plus économique. En effet, l'impression 3D de toute géométrie complexe serait certainement plus rentable pour la réalisation de coffrages ou même d'éléments entiers.

À ce jour, en ce qui concerne l'empreinte carbone, la plupart des projets industriels ont été réalisés avec un mortier riche en ciment Portland malgré les initiatives pour construire avec des matériaux à plus faible impact environnemental. Ce ciment émet une quantité élevée de CO<sub>2</sub> lors de sa production et peut induire des problèmes de durabilité si les phénomènes de retrait ne sont pas maîtrisés. Par conséquent, une attention particulière sera accordée à la cure des éléments imprimés en 3D.

Enfin, les normes ne permettent pas encore de considérer l'impression 3D comme une méthode reconnue pour réaliser des ouvrages en béton. Les initiatives se multiplient en Europe et dans le monde entier pour étudier les nombreux pans de cette technologie de rupture afin de faciliter son inclusion dans les normes associées

au béton et aux ouvrages en béton. En attendant, des labels de qualité volontaire pourraient constituer une solution pour rassurer les différents acteurs quant à la fiabilité de ces matériaux et méthodes innovantes.

Même si l'impression 3D n'en est qu'à ses balbutiements et qu'il reste de nombreux défis à relever, elle mérite notre attention, surtout de par son caractère disruptif à l'échelle de la conception architecturale, de la technologie des matériaux et du processus de construction. Dans un avenir proche, il est peu probable que l'impression 3D remplace les approches traditionnelles, mais elle trouve son application dans certains marchés de niche. La mise à l'échelle de la technologie sur des marchés plus larges dépendra de la réponse que la recherche apportera aux différents défis mentionnés et illustrés tout au long de cette publication. Cependant, les avancées sont tellement rapides dans le domaine de la robotique et de l'automatisation qu'il est impossible d'ignorer son potentiel pour les années à venir.

Les multiples projets de démonstration nous permettront de juger, sur des applications à l'échelle réelle, la véritable valeur ajoutée d'une technologie présentée par certains comme l'innovation potentielle majeure de la dernière décennie.

# Bibliographie

## B

### Bajpayee A. et al.

- B1** 'In situ Resource Utilization and Reconfiguration of Soils Into Construction Materials for the Additive Manufacturing of Buildings', *Frontiers in Materials*, vol. 7, 2020.

### Buildwise (Bruxelles, [www.buildwise.be](http://www.buildwise.be))

- B2** Le béton apparent. Bruxelles, Buildwise, Note d'information technique, n° 268, 2019.

### Bureau de normalisation (Bruxelles, NBN, [www.nbn.be](http://www.nbn.be))

- B3** NBN B 15-001 Béton. Spécification, performances, production et conformité. Complément national à la NBN EN 206.
- B4** NBN B 15-007 Béton apparent. Classifications et spécifications.
- B5** NBN B 15-400 Exécution des structures en béton. Complément national à la NBN EN 13670.
- B6** NBN EN 1015-3 Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie. Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses).
- B7** NBN EN 13369 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
- B8** NBN EN 13670 Exécution des structures en béton.
- B9** NBN EN 197-1 Ciment. Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- B10** NBN EN 197-5 Ciment. Partie 5 : Ciment Portland composé CEM II/C-M et ciment composé CEM VI.
- B11** NBN EN 1990 ANB Eurocode 0. Bases de calcul des structures. Annexe nationale.
- B12** NBN EN 1992 Eurocode 2. Calcul des structures en béton.
- B13** NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.
- B14** NBN EN 206 Béton. Spécification, performances, production et conformité.
- B15** NBN EN ISO 17296-2 Fabrication additive. Principes généraux. Partie 2 : Vue d'ensemble.

## C

### Classen M., Ungermann J. et Sharma R.

- C1** 'Additive Manufacturing of Reinforced Concrete –Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement', *Applied Sciences*, vol. 10, n° 111, 2020.

## H

### Hass L., Nefs K., Bos F.P. et Salet T.A.M.

- H1** 'Application potential of combining strain hardening cementitious composites and helical reinforcement for 3D concrete printed structures: Case study of a spiral staircase', *Journal of Building Engineering*, vol. 80, 2023.



# K

## Khoshnevis B.

- K1** 'Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies', Automation in Construction, vol. 13, pp. 5-19, 2004.

## Khoshnevis B. et Dutton R.

- K2** 'Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials', Materials Technology, vol. 13, pp. 53-56, 1998.

# M

## Ma G., Li Z., Wang L., Bai G.

- M1** 'Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing', Materials Letters, vol. 235, p. 144-147, 2019.

## Marchment T. et Sanjayan J.

- M2** 'Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing', Automation in Construction, vol. 109, 2020.

# O

## Ooms T. et al.

- O1** 'The Production of a Topology-Optimized 3D-Printed Concrete Bridge.' In: Buswell, R., Blanco, A., Cavalaro, S., Kinnell, P. (eds) 'Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication.' DC 2022. RILEM Bookseries, vol. 37. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06116-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06116-5_6), 2022.

# P

## Pegna J.

- P1** 'Exploratory investigation of solid freeform construction', Automation in Construction, vol. 5, pp. 427-437, 1997.

## Perrot A., Rangeard D. et Pierre A.

- P2** 'Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques', Materials and Structures, vol. 49, pp. 1213-1220, 2016.

## Probeton

- P3** PTV 21-601 : 'Éléments préfabriqués en béton architectonique', Probeton.

Une édition de Buildwise (ex-Centre scientifique et technique de la construction),  
établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947.

Éditeur responsable : Olivier Vandooren

Buildwise, Kleine Kloosterstraat 23

B-1932 Zaventem.

D/2024/0611/02

Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et  
recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.

La reproduction ou la traduction, même partielles, des textes et des illustrations  
de la présente publication n'est autorisée qu'avec le consentement écrit  
de l'éditeur responsable.

Révision et mise en page : N. Tilborg

Illustrations : G. Depret

Photographies Buildwise : M. Sohie et al.



Kleine Kloosterstraat 23  
B-1932 Zaventem  
Tél. 02/716 42 11  
E-mail : info@buildwise.be  
Site Internet : buildwise.be

- Avis techniques – Publications
- Gestion – Qualité – Techniques de l'information
- Développement – Valorisation
- Agréments techniques – Normalisation

#### **Buildwise Limelette**

Avenue Pierre Holoffe 21  
B-1342 Limelette  
Tél. 02/655 77 11

- Recherche et innovation
- Formation
- Bibliothèque

#### **Buildwise Brussels**

Rue Dieudonné Lefèvre 17  
B-1020 Bruxelles  
Tél. 02/233 81 00

Après plus d'un demi-siècle d'existence, le Centre scientifique et technique de la construction (CSTC) fait désormais place à Buildwise. Ce nouveau nom porte en lui une orientation nouvelle, davantage axée sur l'innovation, sur la collaboration et sur une approche pluridisciplinaire plus intégrée. Buildwise étant principalement financé par les redevances de quelque 100.000 entreprises de construction belges, celles-ci contribuent ainsi à motiver son action, notamment en définissant ses priorités et en pilotant ses travaux par le biais des Comités techniques.

### **Votre centre de recherche devient centre d'innovation**

Fort des connaissances qu'il a acquises au fil des années, Buildwise s'est imposé comme le centre de référence et d'expertise du secteur de la construction. Buildwise se tient aux côtés de tous les acteurs impliqués dans l'acte de bâtir. Notre objectif ? Transmettre des connaissances qui améliorent réellement la qualité, la productivité et la durabilité, et ouvrir la voie à l'innovation sur chantier et dans l'entreprise.

### **Dynamiser le partage des connaissances et les interconnexions**

Compte tenu de la grande complexité et de la forte fragmentation du processus de construction, Buildwise se doit de renforcer son rôle fédérateur. Nous ne pourrions relever les défis sectoriels et sociétaux qu'en mobilisant le secteur tout entier et en repensant nos modèles d'entreprise et notre façon de collaborer.

### **De la multidisciplinarité à la transdisciplinarité**

Notre spécificité tient à notre approche pragmatique et multidisciplinaire. Pour trouver des solutions solides, il faut une stratégie globale et intégrée. C'est pourquoi nos ambitions s'articulent autour de trois piliers : les technologies numériques, la durabilité et le métier (représenté par les entrepreneurs au sein des Comités techniques).