

# L'impression 3D béton : un catalyseur pour l'innovation constructive

*Romain Mesnil est ingénieur de l'École des Ponts ParisTech et diplômé du MIT. Il est maître de conférences à l'École Nationale des Ponts et Chaussées ou il dirige une équipe de recherche technologique sur la construction numérique et robotisée.*

## **Introduction : présentation de l'impression 3D béton**

Bien que l'impression 3D béton soit souvent présentée comme une technologie émergente, des recherches sont menées dans ce domaine depuis près de vingt ans, et un marché concret existe aujourd'hui pour cette application. L'objectif de ce chapitre n'est pas de vous persuader que tous nos bâtiments seront imprimés en béton dans les dix ou vingt prochaines années, mais plutôt d'explorer comment

développer des systèmes constructifs plus performants.

Nous travaillons activement sur cette thématique à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Cette école d'ingénieurs a d'ailleurs largement contribué aux innovations dans les matériaux de construction, notamment avec Vicat<sup>1</sup>, lui-

---

1. Ingénieur des Ponts et Chaussées cité pour ses contributions majeures aux innovations dans les matériaux de construction. Il est historiquement reconnu pour l'invention du ciment artificiel.

même ingénieur des Ponts et Chaussées, ainsi qu'à l'innovation constructive, comme en témoignent les travaux de Freyssinet<sup>2</sup>, grand concepteur d'ouvrages en béton armé et précontraint.

## 1 Le béton, le coupable idéal de la construction

Le béton, souvent perçu comme un matériau controversé en raison de sa contribution à 7 à 8 % des émissions de gaz à effet de serre, reste pourtant indispensable. Il incarne en quelque sorte le parfait coupable dès qu'il est question de l'impact environnemental du secteur de la

2. Grand ingénieur concepteur d'ouvrages, pionnier du béton armé et inventeur du béton précontraint. Le texte mentionne son travail sur le pont Boutiron (1913) où il a réussi à alléger considérablement les structures.

construction. Chaque année, près de treize milliards de mètres cubes en sont consommés dans le monde<sup>3</sup> – soit, sans que nous n'en ayons forcément conscience, environ deux à trois mètres cubes par personne (Tkachenko, et al., 2023). Pourtant, ce matériau reste difficilement remplaçable pour les fonctions qu'il assure : stabilisation de sol, étanchéité, et structure. À ce jour, et à cette échelle, aucun substitut ne permet de se passer entièrement du clinker<sup>4</sup> et du ciment.

Cette omniprésence du matériau tient de la simplicité de sa composition, schématisée en **figure 1**, ainsi que de la grande disponibilité à bas coût de ses constituants.

Au cœur de la chimie des bétons, on retrouve un liant hydraulique<sup>5</sup> qui durcit progressivement au contact de l'eau. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un broyat de clinker obtenu en chauffant un mélange d'argile et de calcaire. La décarbonatation du calcaire



Figure 1

La composition et les constituants du béton : de gauche à droite et de haut en bas : granulats (photo : William Warby), ciment (photo : Denslenovo), eau, sable (photo : Thamizhpparithi Maari)

3. Le chiffre n'est pas mesuré directement, on l'a ici reconstruit à partir des données de production mondiale de ciment (environ 4,2 milliards de tonnes de ciment par an en 2021) et avec une teneur entre 300 et 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

4. Constituant du ciment produit par calcination. C'est l'élément dont il est le plus difficile de se débarrasser pour réduire l'impact environnemental, car il est le principal responsable des émissions de CO<sub>2</sub>.

5. Matière qui réagit chimiquement lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau pour former une structure solide. Le plus courant est le clinker, mais d'autres liants existent comme les fumées de silice ou les argiles calcinées.

intervenant lors de la cuisson rejette du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, émissions auxquelles on doit ajouter celles dues à la production de chaleur dans les cimenteries. Cependant, d'autres liants sont aujourd'hui développés, comme les fumées de silice, les laitiers de haut-fourneau ou encore les argiles calcinées. Un aspect moins connu, mais tout aussi crucial, est la chimie des adjuvants<sup>6</sup>. Ceux-ci permettent d'améliorer l'ouvrabilité du béton, en le maintenant liquide tout en réduisant la quantité d'eau nécessaire. En effet, plus le mélange contient d'eau, moins le béton sera résistant. Le défi pour celui qui formule le béton est donc de minimiser cette teneur en eau. Les adjuvants sont une solution efficace pour y parvenir, et nous verrons qu'ils jouent un rôle clé dans le développement de l'impression 3D béton.

## 2 Leviers de réduction de l'impact environnemental

Environ 90 % de l'impact environnemental du béton, du moins en termes de réchauffement climatique, provient du ciment. Pour illustrer cela, j'ai choisi de vous présenter l'empreinte carbone de la construction en béton, exprimée en kilogrammes équivalents CO<sub>2</sub>, en la décomposant en s'inspirant de l'identité

6. Produits chimiques ajoutés au mélange pour augmenter l'ouvrabilité du béton (sa fluidité) tout en diminuant la quantité d'eau nécessaire, ce qui permet de conserver une résistance élevée.

de Kaya<sup>7</sup> (Figure 2) (Kaya & Yokobori, 1993).

Même si les termes du numérateur et du dénominateur s'équilibrent dans cette équation, celle-ci permet d'identifier les différents postes, acteurs et stratégies pour réduire l'impact environnemental. Voici les principaux leviers à actionner :

- Premier levier : les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la calcination, qui relèvent des cimentiers. Les solutions incluent le captage du CO<sub>2</sub> ou le recours aux énergies renouvelables pour les fours – un sujet déjà traité dans un autre chapitre.
- Deuxième levier : la substitution du clinker par d'autres liants, comme les argiles calcinées, sujet également traité dans un autre chapitre.

7. Outil mathématique adapté pour décomposer les différents leviers de réduction de l'impact environnemental du béton (procédé, matériau, formulation, efficacité structurelle et sobriété).

**Leviers de réduction d'impact environnemental**

$$kg. eq. CO_2 = \frac{kg. eq. CO_2}{kg. ciment} \cdot \frac{kg. ciment}{kg. liant} \cdot \frac{kg. liant}{kg. béton} \cdot \frac{kg. béton}{m^2} \cdot m^2$$

Calcination (cimentiers)      Substitution (cimentiers)      Formulation (constructeurs)      Structure (ingénieurs)      Sobriété

Figure 2

L'équation de Kaya appliquée au béton et les différents leviers de réduction de l'impact environnemental.

Ces approches exigent des investissements lourds, typiques de l'industrie lourde.

En se déplaçant vers la droite de la **figure 2**, les investissements nécessaires deviennent moins importants :

- Troisième levier : réduire la quantité de liant par kilogramme de béton grâce à une formulation optimisée. L'idée est d'augmenter la part de sable et de granulats, et de maximiser la réaction de chaque grain de ciment avec l'eau.

Ces réflexions aboutissent à deux derniers leviers :

- L'efficacité structurelle : quelle quantité de béton est utilisée par mètre carré construit ? L'objectif final n'est pas la quantité de matériau, mais la surface habitable obtenue.
- La sobriété : quelle surface en béton choisit-on de construire ? Cela peut passer par l'abandon de certains projets ou par l'adoption de matériaux

alternatifs, comme les matériaux bio-sourcés.

### 3 Un peu d'histoire : de l'économie de matière à la massification

#### 3.1. L'ère des chefs-d'œuvre légers (Eiffel et Freyssinet)

Faisons un bref détour, à la fois dans l'espace et dans le temps (**Figure 3**).

Commençons par la France, plus précisément dans le sud du Massif central, avec le viaduc de Garabit, construit par Gustave Eiffel<sup>8</sup> en 1884. Son projet avait été sélectionné en 1880 parce qu'il proposait la structure la plus légère faisable avec les moyens techniques d'alors. À cette époque, le coût d'un ouvrage métallique était directement proportionnel à son poids – il s'agissait alors de fer ou de fonte, et non encore d'acier. Le projet le moins onéreux était donc le plus léger. Ce viaduc, déjà considéré comme un chef-d'œuvre, annonçait les piles élancées de la tour Eiffel, s'affinant vers le haut.

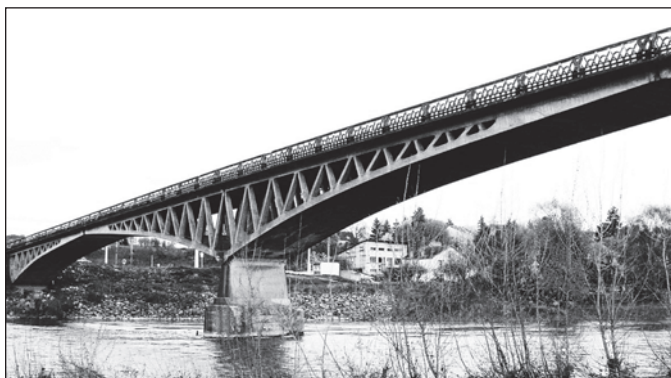
L'approche économique des projets de construction de l'époque rejoignait nos considérations environnementales actuelles et portait sur la minimisation de la quantité de matière. Cette logique perdurerait encore en 1913, comme en témoigne le pont de Boutiron, conçu par Eugène Freyssinet, alors jeune ingénieur des



Figure 3

Photo du viaduc de Garabit dans le Massif central et construit par Gustave Eiffel et Léon Boyer (1884). [Photo : GIRAUD Patrick, distribuée sous licence Creative Commons]

8. Ingénieur célèbre qui a gagné le dialogue compétitif grâce à une structure extrêmement légère, illustrant l'époque où l'optimum économique était lié à l'économie de matière.



**Figure 4**

*Photo du Pont de Boutiron construit par Eugène Freyssinet (1913). Photo : MOSSOT, distribuée sous licence Creative Commons.*

Ponts et Chaussées. Chargé de la conception et de la supervision de plusieurs ponts dans son département d'affectation, il parvint à réduire leurs coûts en allégeant les structures, construisant 3 ponts pour le prix initialement affecté à un seul ouvrage (Billington, 1985). La **figure 4** illustre cette recherche d'optimisation : une solution ajourée, presque en dentelle, avec un arc aux formes innovantes, lui permettant d'alléger considérablement l'ouvrage. Aujourd'hui, un tel projet serait économiquement irréaliste en raison du coût de la main-d'œuvre. On lui préférerait une structure bien moins complexe. Mais à cette époque, l'optimum économique coïncidait presque parfaitement avec l'optimum en matière d'utilisation des matériaux.

### 3.2. La dérive du $xx^e$ siècle

Cette adéquation entre efficacité structurelle et optimisation économique s'est progressivement estompée

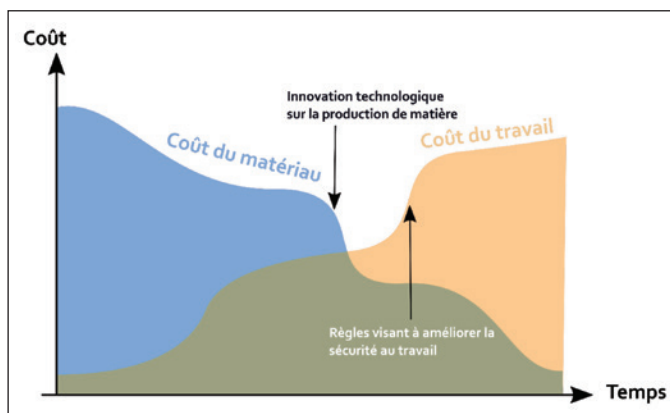
au cours du  $xx^e$  siècle, pour plusieurs raisons.

La première tient à l'évolution du coût des matériaux de construction, notamment ceux issus de l'industrie lourde : ciment, béton et acier. Leur production s'est industrialisée, les procédés se sont optimisés, et leur prix a mécaniquement diminué. Dans le même temps, le coût de la main-d'œuvre n'a cessé d'augmenter, tandis que la productivité sur les chantiers reculait. Résultat : le prix des matériaux a considérablement diminué par rapport à celui du travail. Le prix de la main-d'œuvre a notamment grimpé en raison des exigences accrues en matière de sécurité : les ouvriers consacrent désormais une part importante de leur temps à s'équiper et à respecter des procédures qui ne génèrent pas de production directe. Ces mesures de sécurité ont porté leurs fruits puisque la mortalité sur les chantiers a baissé de façon significative, même si elle reste plus élevée que dans d'autres secteurs

industriels. Pourtant, cette augmentation des contraintes n'a pas été contrebalancée par des gains de productivité liés à une mécanisation accrue des chantiers (*Figure 5*).

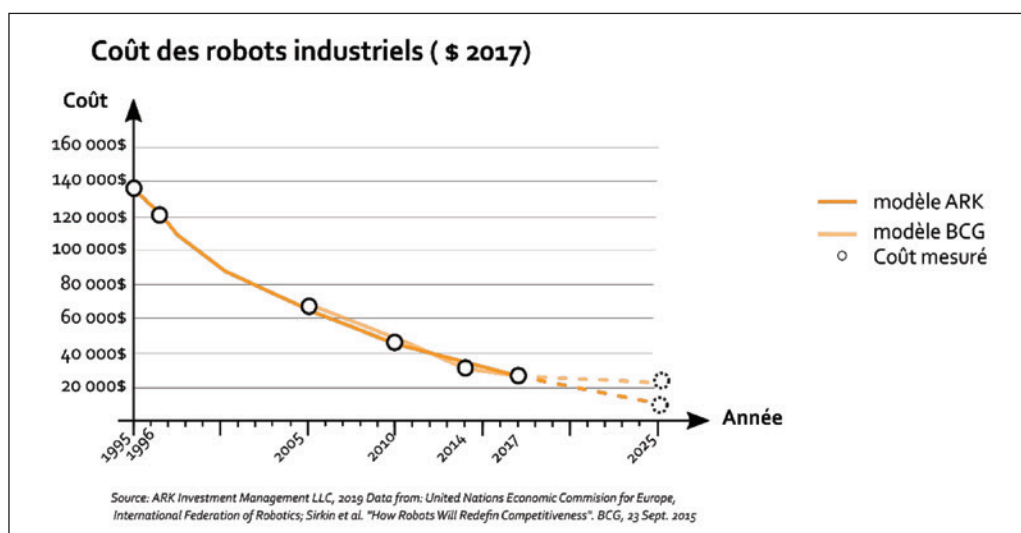
La *figure 6* intègre une perspective supplémentaire : l'évolution des coûts dans le domaine de la robotique. En l'espace de

vingt ans, le prix des robots industriels a été divisé par quatre environ. Aujourd'hui, ils deviennent compétitifs sur le plan économique. Pour donner une idée de l'ordre, l'acquisition d'un robot équivaut désormais à peu près au salaire d'un ouvrier qualifié sur une année. Cette donnée est désormais un paramètre à prendre en



**Figure 5**

Évolution schématisée du coût du travail et du matériel au  $xx^e$  siècle.



**Figure 6**

Évolution du prix de la robotique industrielle au cours des années.

compte dans les calculs économiques.

La question centrale que soulèvent nos recherches sur l'impression 3D est la suivante : la robotique ne pourrait-elle pas nous permettre de retrouver une certaine complexité dans les structures, et ainsi réintroduire de l'efficacité matérielle, en complément ou en substitution du travail des compagnons et des ouvriers ?

### 3.3. L'innovation et les technologies jusqu'au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle

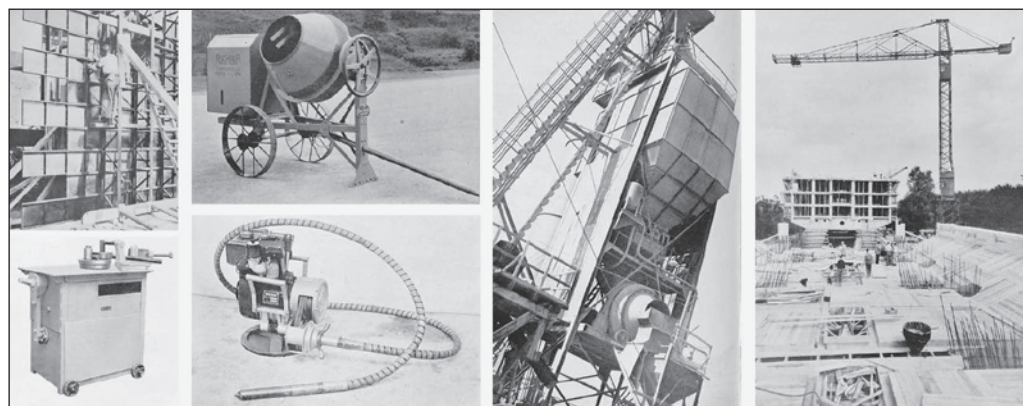
Au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle, l'énergie et les matériaux deviendront plus coûteux, que ce soit en raison de leur impact environnemental ou de leur rareté croissante – comme c'est déjà le cas pour le bois au cours de la dernière décennie, par exemple. L'enjeu est donc de déterminer si nous pouvons allier économie de matière et gain de productivité. C'est précisément l'objectif que nous poursuivons à travers nos travaux sur l'impression 3D, et

la robotique en général. Pour illustrer les technologies en jeu, nous pouvons contempler une image issue d'un manuel de construction datant de 1949 (*Figure 7*).

Une telle image ne devrait pas être étrangère à ceux ayant visité ou travaillé sur un chantier récemment. Les techniques de construction n'ont guère évolué : cette photographie, prise il y a près de 80 ans, pourrait presque passer pour une scène contemporaine. Peu de choses ont changé en matière de techniques de construction.

Si l'innovation technique ne se diffuse pas encore sur tous les chantiers, les recherches sur l'automatisation et l'impression 3D se multiplient. Un chercheur irano-américain, Behrokh Khoshnevis<sup>9</sup>, a été l'un des premiers à proposer l'idée d'imprimer du béton par

9. Chercheur irano-américain qui a initié l'enthousiasme pour l'impression 3D béton par extrusion. Il a imaginé des systèmes pour construire des maisons ou des bases lunaires.



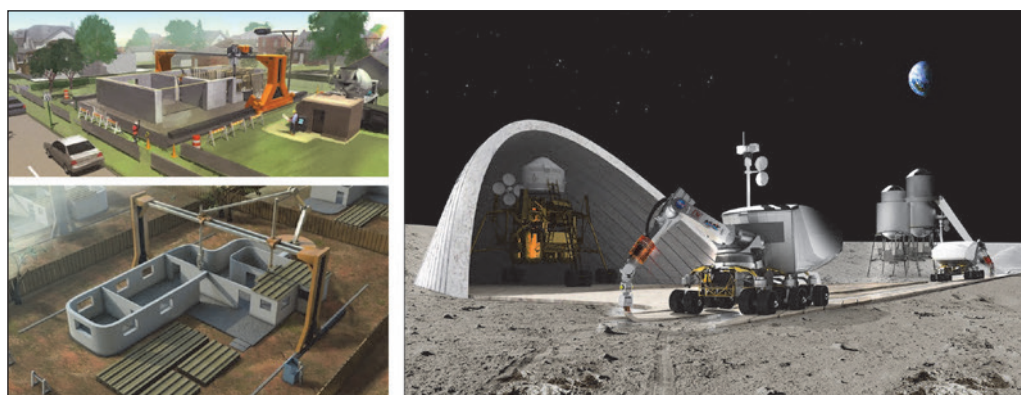
**Figure 7**

*Images des technologies présentes sur les chantiers de construction en 1949 tirées d'un manuel de construction de 1949 [Genouville, 1949].*

extrusion avec le concept de *Contour Crafting*. Ses visuels futuristes ont suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique et inspiré de nombreuses start-ups, dont certaines sont aujourd'hui des entreprises bien établies (*Figure 8*).

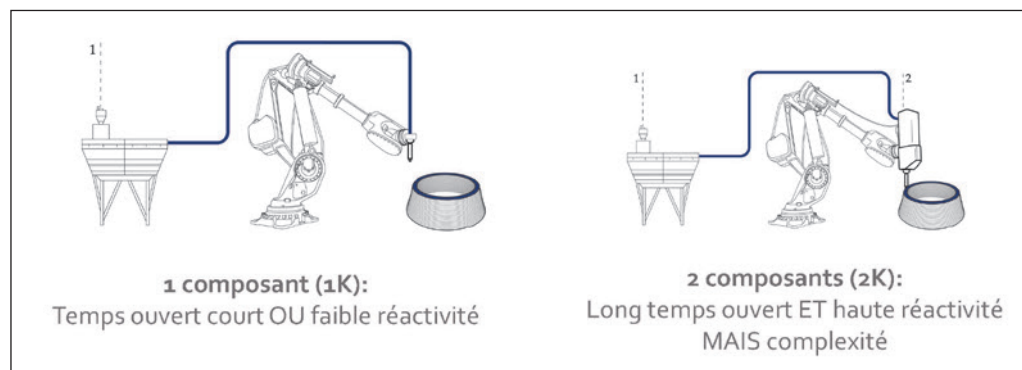
L'objectif affiché est de concevoir des imprimantes géantes capables de construire des maisons, voire des bases lunaires. Ce modèle a séduit

quelques architectes et constructeurs, mais il présente aussi des limites évidentes : si l'imprimante doit être plus grande que la maison elle-même, comment envisager la construction d'un immeuble sans se heurter à un problème d'échelle ? De plus, comment s'assurer que cette technologie est bien compatible avec les objectifs de réduction de consommation de béton ?



**Figure 8**

Représentation 3D de l'impression 3D béton : à gauche, construction de maisons monolithique [source : <http://contourcrafting.com/>], à droite : coque pour une base lunaire (Khoshnevis, Carlson, Leach, & Thangavelu, 2012)



**Figure 9**

Les deux principes de fonctionnement de l'impression 3D béton (1 ou 2 composants) avec leurs avantages et leurs inconvénients.

## 4 La technologie de l'impression 3D béton

### 4.1. Le principe de fonctionnement

Le principe de l'impression 3D par extrusion<sup>10</sup> n'a, au fond, pas fondamentalement évolué depuis les propositions initiales de Khoshnevis (*Figure 9*).

Le système repose sur un mélange de mortier ou de béton, qui est ensuite pompé puis acheminé vers une buse d'extrusion. Celle-ci est pilotée par un dispositif robotisé – qu'il s'agisse d'un robot industriel ou d'un portique – suivant une trajectoire programmée. Cette méthode permet de réaliser des formes d'une complexité quasi illimitée.

### 4.2. Les méthodes de durcissement du béton

Sur le plan de la chimie, deux approches se dégagent :

- la première consiste à utiliser des mélanges très réactifs, à base de ciments à prise rapide, qui durcissent en une dizaine de minutes (généralement vingt minutes) dès leur contact avec l'eau. Le béton est alors malaxé et pompé en continu en petites quantités vers la machine ;
- la seconde, celle que nous privilégions dans notre laboratoire, repose sur un béton formulé avec des additifs prolongeant le

temps ouvert<sup>11</sup> : le matériau reste stable et peu réactif pendant une à deux heures. Un second additif, ajouté en fin d'extrusion, déclenche alors une prise accélérée. Cette méthode présente l'avantage de dissocier les contraintes de pompage et de réactivité. En cas de problème, le délai disponible pour purger et nettoyer les tuyaux est bien plus confortable. En revanche, elle introduit une complexité chimique accrue, car les interactions entre les adjuvants varient selon les types de ciment. Peu d'acteurs maîtrisent cette technique, ce qui la rend plus exigeante (*Figure 10*).

Grâce à cette technologie, il est possible d'imprimer une colonne d'environ 1,80 m en seulement 20 minutes, et d'atteindre des hauteurs importantes. À titre de comparaison, un béton traditionnel ne peut être décoffré qu'après une dizaine d'heures dans des cas favorables. En revanche, comme mentionné précédemment, la formulation doit être extrêmement précise, car le béton risque de se reliquéfier si la structuration du matériau est insuffisante. Les divers adjuvants (plastifiants, retardeurs et accélérateurs de prise) jouent donc un rôle capital dans le développement et la fiabilisation du procédé d'impression 3D de béton.

11. Période durant laquelle le béton reste utilisable et liquide avant de durcir. L'utilisation d'additifs permet de garder ce temps long pour faciliter le pompage, avant d'ajouter un accélérateur en fin de buse.



*Figure 10*

*Impression 3D béton à 2 composantes. Vitesse d'impression verticale avec une stratégie 2K : plusieurs mètres par heure !*

10. Technologie consistant à pomper un mortier ou un béton à travers un nez d'extrusion manipulé par un robot pour créer des formes complexes par couches successives.

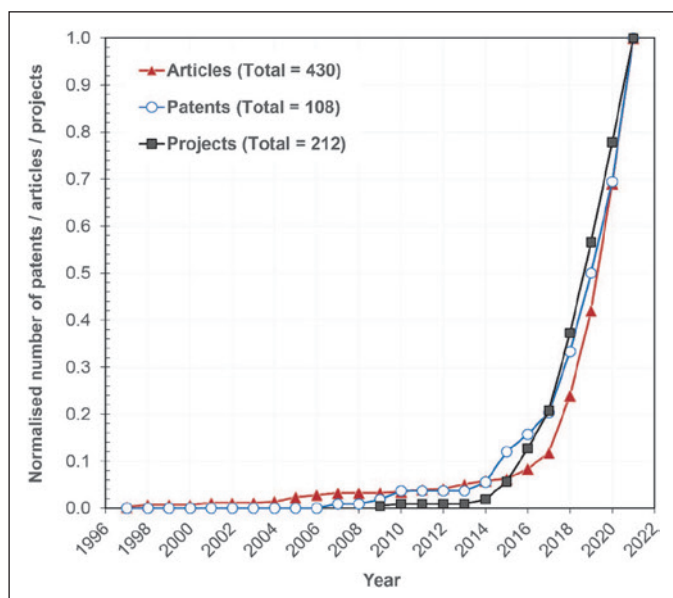


Figure 11

Évolution du nombre d'articles et de brevets de 1996 à 2022.

Source : Ma et al. (2022).



Figure 12

Mur obtenu par impression 3D.

## 5 Applications et utilisation de l'impression 3D béton

L'adoption de cette technologie se généralise, comme le confirme l'essor du nombre

de publications et de brevets (Figure 11).

On observe une progression quasi exponentielle : entre 100 et 200 laboratoires dans le monde savent désormais imprimer du béton en 3D. Ce marché pèse aujourd'hui un peu plus d'un milliard d'euros annuellement. Bien que modeste comparé à l'ensemble du secteur de la construction, ce domaine s'affirme comme un secteur dynamique et en plein essor.

Dans le domaine de l'habitat, l'application la plus directe de l'impression 3D béton est la construction de murs. Il convient donc de se doter de quelques ordres de grandeur. À titre de comparaison, un mur en parpaings nécessite environ 180 kg de béton par mètre carré de mortier – un chiffre à retenir.

Des solutions bien plus optimisées existent, comme le montre l'exemple de la figure 12, issu d'une thèse menée en partenariat avec Lafarge par Romain Duballet (Duballet, 2019). Ses travaux explorent les marchés potentiels de cette technologie. Il a réussi, par extrusion, à créer des blocs en matériaux isolants – ici du polystyrène, mais le principe pourrait s'appliquer à d'autres matériaux.

Avec cette approche, on parvient à assurer les mêmes fonctions qu'un mur en parpaings, mais avec seulement 50 kg de matière par mètre carré. La figure 13 montre l'image d'un mur que nous avons imprimé dès 2019 : une époque déjà lointaine au regard de l'évolution rapide de ces technologies.

Dans cet exemple, on observe que les éléments isolants sont positionnés en amont, puis que le robot dépose précisément le matériau aux endroits stratégiques, déterminés par des modèles de mécanique des structures aux éléments finis. Le fait d'intégrer la structure dans l'isolant améliore également la performance thermique du mur, même si ce prototype présentait encore des imperfections.

Cette technologie recèle un potentiel considérable, mais l'efficacité des structures varie encore énormément selon les applications. Ainsi, le poids des murs imprimés par *Contour Crafting* atteint 350 kg par mètre carré, environ deux fois plus qu'un mur en parpaings. Les acteurs qui développent cette technologie n'ont pas forcément pour priorité le développement durable, mais plutôt la mécanisation et la réduction des coûts de main-d'œuvre.

Pourtant, il est essentiel, lorsqu'on développe une nouvelle technologie, de clarifier ses objectifs et ses applications. À mon sens, nous en sommes encore à cette étape : définir comment exploiter au mieux le béton en impression 3D et pour quelles finalités.

### Le béton comme « coffrage perdu<sup>12</sup> »

Nous nous trouvons à un carrefour, avec deux scénarios principaux pour l'utilisation

12. Technique consistant à utiliser l'impression 3D pour créer une « coque » ou un moule en béton qui ne sera pas retiré, mais qui recevra du béton coulé et participera parfois à la résistance finale de la pièce.



Figure 13

Image de l'impression d'un mur.

Source : R. Duballet et al. "Free deposition printing for space truss structures." RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing, 2020.

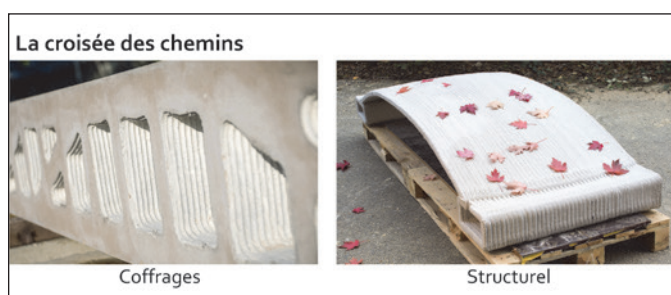


Figure 14

Les deux scénarios d'utilisation de l'impression 3D : un coffrage permettant de construire avec des vides (photo : Stefano Borghi/ENPC), ou un objet pleinement structurel (photo : Léo Demont).

de l'impression 3D béton (Figure 14). Le premier consiste à employer le béton imprimé pour réaliser des coffrages, afin d'optimiser la fabrication de structures en béton armé. La seconde option, plus ambitieuse, vise à imprimer directement des éléments structurels.

Pour illustrer la première approche, examinons un projet mené avec un doctorant, Sébastien Maitenaz (Maitenaz, 2022) (Figure 15).

- Optimisation de la méthode des bielles et tirants
- Méthode paramétrique, compatible avec l'Eurocode2 et autres codes de calcul
- Economie de béton entre 20% et 60%
- Des moules très complexes

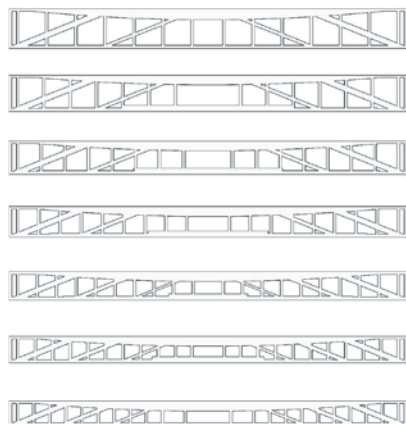


Figure 15

Projet de coffrage.

Source : Sébastien Maitenaz (2024).

### Optimiser les structures

L'idée était d'analyser les charges supportées par le bâtiment et d'identifier les zones où la matière n'apportait aucune contribution à la résistance

de la structure. Grâce à cette méthode, il devient possible de percer des ouvertures à de nombreux endroits, ce qui permet d'économiser entre 20 et 60 % de matière, selon les

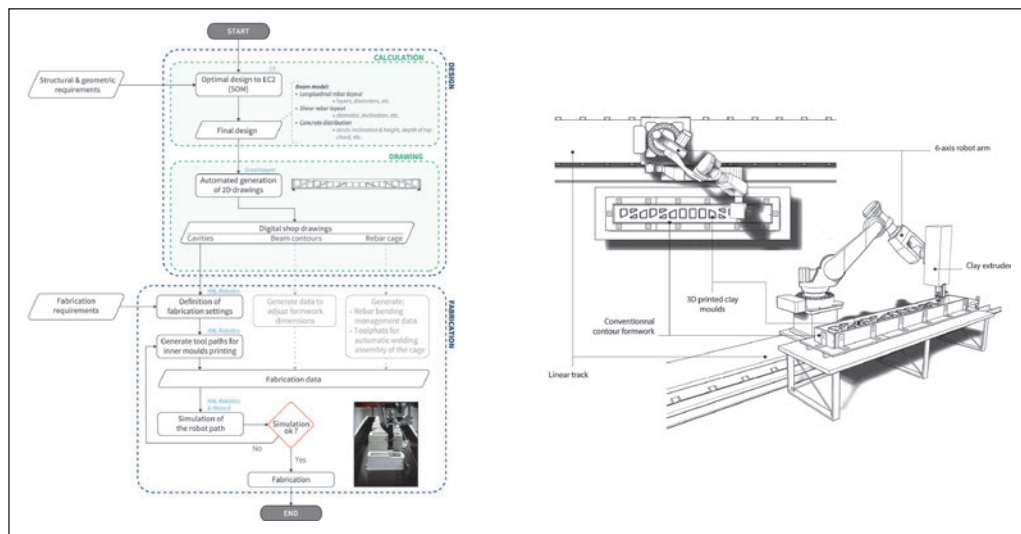


Figure 16

Programme d'automatisation du robot.

Source : Sébastien Maitenaz (2024).

portées et les charges appliquées. En moyenne, le gain se situe autour de 30 % : un potentiel de réduction non négligeable.

Le défi réside dans le fait que la fabrication de ces coffrages par des méthodes traditionnelles n'est pas économiquement viable. Il est donc nécessaire d'automatiser les calculs mécaniques pour convertir ces données géométriques en instructions exploitables par le robot, afin de générer les trajectoires d'impression (Figure 16).

Nous avons conçu des moules légèrement différents les uns des autres. Les premières versions étaient imprimées en terre – ici, il s'agit de kaolinite, ce qui explique la couleur blanche, mais ce choix de matériau n'est pas lié au projet en lui-même (Figure 17).



Figure 17

Photo de l'impression de kaolinite.

Ensuite, il est indispensable de procéder à des essais mécaniques pour valider les performances (Figure 18). Les courbes de couleur représentent la relation entre force appliquée et déplacement pour les poutres évidées tandis que la courbe grise correspond à la mesure effectuée sur une

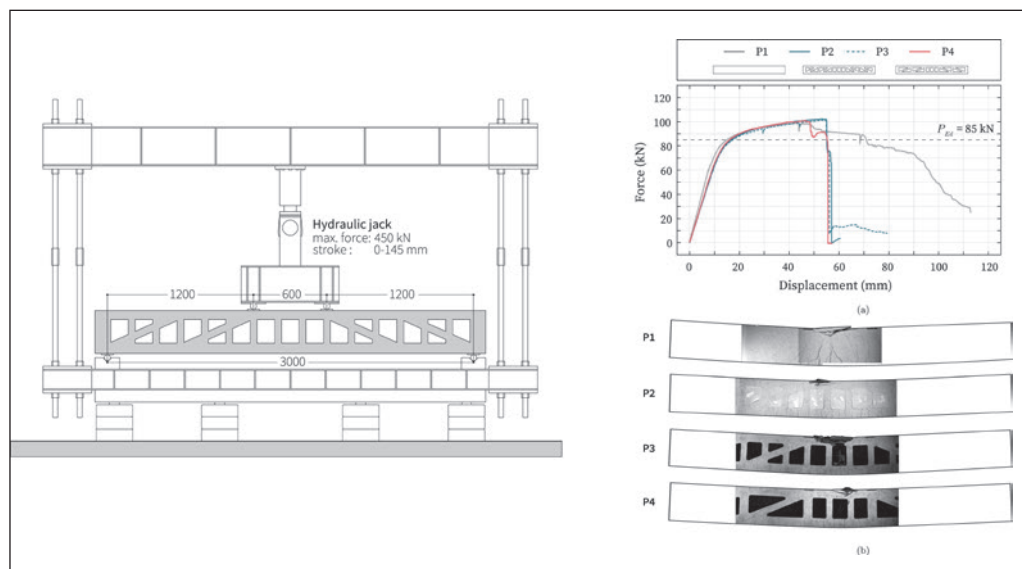


Figure 18

Essais mécaniques sur les poutres creuses imprimées en kaolinite.



**Figure 19**

*Vidéo d'un projet européen.*

Source : LIAISON, fondé par l'Union européenne, projet n° 101103698.

poutre pleine. On constate que toutes les poutres supportent les mêmes charges : il n'y a aucune perte de fonctionnalité, mais une réduction de 30 % de la quantité de matière utilisée.

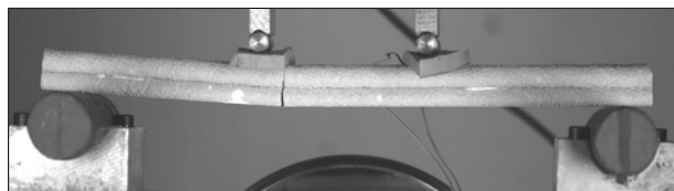
Nous avons poursuivi ce projet en remplaçant les moules en argile par des moules en béton. Pourquoi ? Parce que la séparation des moules en argile est longue et délicate, et que leur fragilité pose problème. Le béton offre une bien meilleure robustesse. Cependant, en passant au béton, la compréhension de la chimie de la prise retrouve toute son importance : il s'agit de garantir la durabilité et de qualifier les interfaces entre le béton imprimé et le béton

coulé, afin d'intégrer pleinement ce matériau dans la résistance et la durabilité de la pièce. Ce projet, mené dans le cadre d'un programme européen, est en cours de finalisation (**Figure 19**).

### *Vers un béton imprimé structurel*

Lorsque l'on évoque le béton, on pense généralement au béton armé, c'est-à-dire un matériau renforcé par des armatures en acier qui en assurent la ductilité. En effet, le béton non-armé est une céramique, il est fragile et bien moins résistant en traction qu'en compression. Le couplage du béton et d'un matériau de renfort permet de créer un matériau composite à la fois ductile et résistant en traction. La **figure 20** montre une éprouvette en béton sans fibre d'acier, photographiée juste avant sa rupture lors d'un essai mécanique.

Sans armature, le béton forme une structure fragile : dès qu'une fissure apparaît, elle se propage jusqu'à la rupture brutale. Une telle situation est inacceptable pour un bâtiment, où l'on préfère des signes avant-coureurs (déformations ou bruits) permettant aux occupants d'évacuer avant un éventuel effondrement. Pour remédier à cela, on utilise généralement de l'acier, mais on peut aussi incorporer des fibres. Plus la quantité de fibres est importante, plus la capacité de déformation du matériau augmente : la **figure 21** montre un essai sur une éprouvette imprimée avec 1.5% de fibres de carbone. On observe plusieurs fissures qui illustrent la capacité du



**Figure 20**

*Photo d'une éprouvette en béton avant la rupture. Photo : de Bono (2025).*

matériau à redistribuer les efforts. Le comportement de ces nouveaux matériaux composites dépend de la qualité de l'interface entre la fibre et le béton : une interface très faible conduit à une faible résistance de la structure, tandis qu'une interface trop résistante peut compromettre la ductilité du matériau. La maîtrise de la chimie des interfaces, et des éventuels traitements de surface des fibres (enzymage, imprégnation) est donc essentielle pour obtenir des matériaux aussi performants que possibles. De même, la durabilité des fibres dans le béton, où l'eau libre a un pH supérieur à 12, est un défi qui amène les contrôleurs à être très prudents quant à l'adoption de ces matériaux.

Nous avons développé et breveté un procédé permettant d'intégrer des fibres en continu, compatible avec tous types de fibres : carbone, verre alcali-résistant, basalte, acier. Des démonstrateurs ont déjà été réalisés, comme le montre Victor de Bono avec qui, nous avons étudié comment optimiser des structures en coque mince. Ce nouveau matériau, couplé avec la liberté formelle de l'impression 3D permet de réaliser des éléments de six mètres de portée avec seulement trois centimètres d'épaisseur. Elle s'avère donc extrêmement efficace et environ cinq fois plus légère que

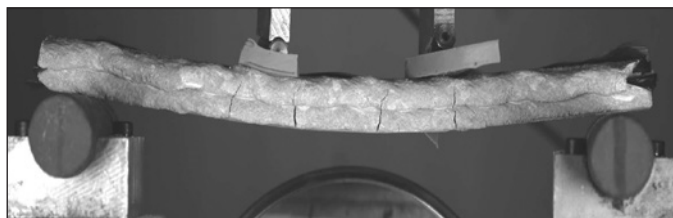


Figure 21

Photo d'une éprouvette en béton avec des fibres avant la rupture.  
Photo : de Bono (2025).



Figure 22

Essai mécanique : résultat d'une charge de 1,3 tonnes sur une coque de 100 kg. Photo : Victor de Bono/ENPC.

les structures en béton armé traditionnelles.

Nous avons mené des essais d'impression à grande échelle ainsi que des tests mécaniques, mettant en évidence cette multi-fissuration recherchée pour dissiper l'énergie. Sur la [figure 22](#), vous pouvez observer le résultat : la coque, pesant environ 130 kg, supporte une charge de 1,3 tonne et présente une capacité de déformation importante.

## Conclusion

Ce panorama de recherches en cours montre la richesse du procédé d'impression 3D béton. La chimie joue un rôle de premier plan dans le développement de cette technologie : le développement de nouveaux adjuvants permet au matériau de durcir en quelques minutes. Le procédé de fibrage qui a été brièvement présenté amène son lot de questions ouvertes quant à la chimie des interfaces entre fibres et béton. Une recherche de fondamentale doit encore être menée pour donner des gages de durabilité et de qualité aux constructeurs.

Nous venons de discuter de quelques exemples qui montrent que cette technologie peut être au service de la réduction de matière, mais que si elle est utilisée dans le seul but d'augmenter la productivité du travail, elle peut être largement contre-productive d'un point de vue environnemental. Comme le titre de cette présentation le suggère, l'impression 3D doit être une opportunité de catalyser l'innovation constructive, avec pour objectif la réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de construction. En revenant à l'équation rappelée dans la **figure 23**, les exemples discutés ici suggèrent qu'en intégrant l'industrialisation et

$$kg.eq.CO_2 = \frac{kg.eq.CO_2}{kg.ciment} \cdot \frac{kg.ciment}{kg.liant} \cdot \frac{kg.liant}{kg.béton} \cdot \frac{kg.béton}{m^2} \cdot m^2$$

-15%  
(préfabrication)

-40%

~ -50%

**Figure 23**

Potentiel de réduction d'impact par la structure et la préfabrication.

la préfabrication, on peut économiser entre 30 et 40 % de matière. En maîtrisant les conditions de mise en œuvre et en optimisant les formulations, on peut également réaliser des gains significatifs. Ainsi, une économie substantielle peut être réalisée en aval de la construction, grâce à une conception bien pensée. Ce levier d'efficacité est au moins aussi important que les leviers disponibles au niveau de l'industrie cimentière, mais il est encore trop largement ignoré.

### TRAVAUX CITÉS

- Billington, D. (1985). *The Tower and the Bridge*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- de Bono, V. (2025). *Étude des procédés d'impression 3D de bétons fibrés pour la construction. Formulation, renforcement et application*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Duballet, R. (2019). *Systèmes constructifs en fabrication additive de matériaux cimentaires*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Genouville, P. (1949). *1849-1949 : Cent Ans de Béton Armé. Le Béton Armé, Son Outillage*. Travaux.
- Kaya, Y., & Yokobori, K. (1993). *Environment, energy, and economy : strategies for sustainability : Tokyo conference on Global Environment, Energy and Economic Development*. Tokyo: United Nations Univ. Press.
- Khoshnevis, B., Carlson, A., Leach, N., & Thangavelu, M. (2012). *Contour crafting simulation plan for lunar settlement infrastructure build-up*. NIAC Phase-I Final Project Report .
- Ma, G., Buswell, R., Leal da Silva, W., Wang, L., Xu, J., & Jones, S. Z. (2022). Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cement and Concrete Research*, 156, 106774.
- Maitenaz, S. (2022). *Optimisation and digital fabrication of concrete structures*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Tkachenko, N., Tang, K., McCarten, M., Reece, S., Kampmann, D., Hickey, C., . . . Caldecott, B. (2023). Global database of cement production assets and upstream suppliers. *Scientific Data*, 1-9.