A photograph of a modern, multi-story building facade. The building features a series of balconies with glass railings and vertical slat panels. The balconies are staggered, creating a dynamic, geometric pattern. The building is set against a clear blue sky. The overall aesthetic is clean and contemporary.

CONSTRUIRE HORS-SITE

Méthodes • Outils • Retours d'expériences

Sous la direction de Stéphane Berthier et Eva Madec

Préface de Pierre Paulot

EDITIONS

LE MONITEUR

SOMMAIRE

Préface

Pierre Paulot

8

Introduction

Stéphane Berthier

13

Session 1

Histoire et problématiques environnementales

1 - Le béton assemblé : préfabriquer dans la France de l'après-guerre

Yvan Delemontey

21

2 - Construire " hors-site " : une nécessité économique, sociale - et écologique ?

Susanne Stacher

49

3 - Industrialiser la construction en pierre massive porteuse : un procédé de préfabrication innovant

Marios Vekinis

71

4 - La préfabrication aujourd'hui

Eva Madec

83

5 - Toits Temporaires Urbains : construction hors-site en bois pour un urbanisme temporaire

Inès Delépine, Guillaume Duranel, Margotte Lamouroux

93

6 - La préfabrication comme solution face au problème écologique ?

Antoine Perron

105

Table ronde 1

Histoire et problématiques environnementales

117

Session 2

Concepts et méthodes

7 - Construire sans fabriquer, nouveau paradigme de conception pour une économie circulaire
Corentin Fivet 129

8 - L'industrialisation de la construction, une opportunité pour imaginer le futur de l'architecture bioclimatique : régionalisée, sobre et durable
Romain Gérard 141

9 - La construction hors-site du XXI^e siècle n'est pas la construction préfabriquée d'après-guerre, c'est la Construction Orientée Objet
Pascal Chazal 155

10 - L'industrialisation de la rénovation énergétique : un système d'acteurs en restructuration
Margot Pellegrino, Carole Wernert, Angéline Chartier 165

Table ronde 2

Concepts et méthodes 177

Session 3

Outils numériques et robotiques

11 - Les usines modulaires pour l'architecture non-standard
Romain Mesnil 187

12 - Impression béton et construction hors-site
Jean-François Caron 195

13 - Industrialisation circulaire automatisée pour la résilience éco-sociale
Thomas Bock 203

14 - Les nouvelles technologies du hors-site : l'impression 3D
Klaas de Rycke, Julien Delayre, Pierre Marquis Lhuillier 213

15 - Repenser la permanence

Oliver Tessmann, Max Eschenbach, Anne-Kristin Wagner,
Christoph Kuhn et Samim Mehdizadeh

227

Table ronde 3

Outils numériques et robotiques

239

Session 4

Retours d'expériences de praticiens réflexifs

16 - Construire l'usage

Ingrid Taillandier

247

17 - Influence de la construction hors-site sur l'empreinte carbone d'un bâtiment : le cas du Stream Building

Camille Ouvrard, Laélia Vulot, Pauline Detavernier, Sébastien Truchot

259

18 - Préfabrication et enseignement du projet

Philippe Rizzotti

273

19 - Répète ton élément : architecture et construction

Andrea Bassi

285

Table ronde 4

Retours d'expériences de praticiens réflexifs

295

Conclusion

Stéphane Berthier

303

Remerciements

Index des noms

311

Index des projets et procédés

317

La préfabrication est à la mode, c'est un fait. Désormais désignée sous le vocable de « construction hors-site » (de l'anglais *off-site construction*), la préfabrication revient depuis quelques années sur le devant de la scène architecturale et constructive à la faveur de la transition écologique et des nouvelles technologies numériques. Non seulement la préfabrication réinvestit les chantiers, mais on lui consacre des ouvrages, elle fait l'objet d'expositions et se retrouve au centre de journées d'étude et de colloques internationaux. Ce succès récent serait-il le signe d'un retour en grâce ? La préfabrication serait-elle enfin sortie en France de son purgatoire ?

Si l'on se place dans une perspective historique, on observe que la préfabrication aura constitué l'un des thèmes majeurs de la modernité architecturale au XX^e siècle, avant de s'éclipser durablement à l'aube des années 1980. Si les raisons de ce déclin sont essentiellement techniques et économiques, elles correspondent sur le plan idéologique à l'essoufflement d'un certain nombre d'idéaux sociaux et politiques qui sous-tendaient la plupart des réflexions et des expériences dans le domaine de l'industrialisation du bâtiment¹. À ce changement brusque de paradigme s'ajoute plus spécifiquement, dans le cas de la France, un traumatisme associé aux *grands ensembles*. Naguère porteuse d'espérances, la préfabrication a été rapidement dénoncée comme le fer de lance d'une politique d'urbanisation technocratique dictée par des visées essentiellement quantitatives (loger le plus grand nombre, le plus rapidement possible et au moindre coût), pour finir par être accusée d'être à l'origine de logiques ségrégatives. Si l'on se gardera ici de tout déterminisme technique, force est de constater que l'aversion pour la construction industrialisée en général et la préfabrication en particulier s'avère des plus tenace dans l'Hexagone.

Notre rapport à la « préfa » est donc complexe, ambivalent, oscillant selon les époques entre fascination et répulsion, entre espoirs et désillusions. Cet effet de balancier est d'autant plus puissant que les bienfaits de la préfabrication ont été exaltés en France comme nulle part ailleurs en Europe, mise à part peut-être dans les États postsoviétiques², le pays se forgeant après-guerre une image de champion incontesté de la construction industrialisée. Un tel leadership n'aurait pu advenir sans la rencontre avec un matériau phare dont la France a longtemps revendiqué la paternité : le *béton armé*. En effet, jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, la préfabrication avait été une affaire essentiellement métallique, l'acier se prêtant mieux à un montage à sec, alliant légèreté, rapidité et précision. En dépit de ses atouts, la préfabrication française se tourne à la Libération vers le « tout béton », s'appuyant sur l'expérience et le savoir-faire des grands corps d'ingénieurs. Alors que les avantages technico-économiques du matériau sont

1. Voir Antoine Picon, « L'industrialisation du bâtiment : un projet technique et politique », dans Franz Graf, Yvan Delemontey (dir.), *Architecture industrialisée et préfabriquée : connaissance et sauvegarde/Understanding and Conserving Industrialised and Prefabricated Architecture*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), 2012, p. 48-62.

2. Voir Natalya Solopova, *La préfabrication en URSS. Concepts techniques et dispositifs architecturaux*, Berlin, DOM Publishers, 2021 ; Pedro Ignacio Alonso, Hugo Palmarola (dir.), *Flying Panels: How Concrete Panels Changed the World*, Stockholm/Santiago du Chili/Berlin, ArkDes/Ediciones UC/DOM Publishers, 2019.

évidents (faible coût, facilité d'approvisionnement et de mise en œuvre, plasticité formelle, etc.), sa suprématie s'explique aussi par un contexte d'économie de guerre qui absorbe la quasi-totalité des besoins en acier, d'abord pour l'armement, puis pour la remise en état des grandes infrastructures de production et de transport.

Si l'industrialisation du bâtiment ne peut se réduire à sa préfabrication, dont elle ne constitue qu'une des expressions privilégiées, force est de constater que le débat tourne en France principalement autour de cette question. Dès lors, une préfabrication en chasse une autre : celle des *agglomérés* d'abord qui, moulés facilement et à peu de frais sur les chantiers de la Reconstruction, sont rapidement remplacés par les *panneaux lourds* produits en usine, auxquels succèdent à leur tour, vers la fin des années 1960, les *composants modulables* de l'« industrialisation ouverte » censée libérer l'homme des contraintes de son habitat. Finalement, quelles que soient la nature, l'urgence et l'importance des besoins (reconstruction, puis construction massive de logements), on pense d'abord et toujours en termes de préfabrication. Cependant, si l'on souhaite sonder cette singularité française du « béton assemblé »³, il convient d'interroger la préfabrication avant qu'elle ne tombe « dans le panneau », pour reprendre le bon mot du regretté Paul Chemetov⁴.

Cela nous ramène dans l'immédiat après-guerre, période marquée par les pénuries en tout genre (de logements, de matières premières et d'énergie, de matériaux de construction, de main-d'œuvre, etc.) qui obligent les acteurs à innover et expérimenter, à faire mieux avec moins, à redécouvrir et perfectionner des matériaux et des techniques que l'on croyait révolus. Il s'agit d'un moment de bascule au cours duquel l'on s'efforce par tous les moyens de tracer les linéaments d'un monde nouveau. Ce moment particulier de l'histoire rappelle à bien des égards la période que nous traversons aujourd'hui, et il n'est pas inutile d'esquisser quelques parallèles instructifs entre ce passé récent, souvent oublié, et notre présent, tout en gardant à l'esprit que les deux situations ne sont pas les mêmes, que l'histoire ne se rejoue jamais exactement.

C'est donc armé de ces quelques précautions que les pages qui suivent proposent un voyage en douze étapes dans l'univers de la préfabrication au lendemain de la guerre. Si, à cette évocation, d'aucuns ont en tête l'image devenue célèbre de la main corbuséenne plaçant dans son « casier » la cellule d'habitation, il faut reconnaître que celle-ci est bien peu représentative de la réalité de l'industrialisation du bâtiment au cours de cette période. Moins spectaculaire, cette réalité n'en est pas moins le fruit d'une aventure technique et constructive sans précédent, qui se caractérise à la fois par un foisonnement de nouveaux procédés et un raffinement extrême de leur conception.

3. Voir Yvan Delemontey, *Reconstruire la France. L'aventure du béton assemblé, 1940-1955*, Paris, Éditions de la Villette, 2015.

4. Voir Paul Chemetov, « Dans le panneau », *Forum*, n° 80, janvier-avril 1964, publié dans *Paul Chemetov. Un architecte dans le siècle*, Paris, Le Moniteur, 2002, p. 147-149.

Retard

« Archaïque », « à la traîne », « arriéré », les qualificatifs ne manquent pas pour dénoncer la situation dans laquelle se trouve le bâtiment en 1945. Architectes, ingénieurs et industriels n'ont alors pas assez de mots durs pour condamner le « retard » pris par le bâtiment sur les autres activités productives. Réel ou fantasmé, ce leitmotiv du retard – que certains invoquent d'ailleurs toujours aujourd'hui ! – est surtout un plaidoyer en creux en faveur de la modernisation d'un secteur appelé à relever les défis de la Reconstruction. Car au fond, que reproche-t-on au bâtiment sinon d'être resté largement artisanal ? Il est vrai qu'en dépit des progrès accomplis durant l'entre-deux-guerres, les méthodes d'exécution ont globalement peu évolué depuis 1918. Si les causes sont en partie conjoncturelles, il ne faut pas négliger la nature profondément conservatrice du bâtiment. En effet, contrairement aux grands secteurs de production de masse, la plupart des ouvrages sont encore réalisés en place, sur-mesure et par une main-d'œuvre nombreuse et qualifiée. De même, à la différence des travaux publics, dont le marché est dominé par une poignée de puissantes firmes nationales, celui du bâtiment s'organise autour d'une myriade de petites entreprises locales dont la plupart ne comptent pas plus de cinq ouvriers. À ces difficultés structurelles s'ajoute à la Libération une carence en matériaux de construction liée au rationnement des matières premières (charbon, acier), ainsi qu'un manque de main-d'œuvre largement réduite et dispersée par la guerre. Comment, dans ces conditions, répondre à la triple injonction – construire en masse, plus vite et à meilleur marché – qu'impose la reconstruction urgente du pays ? L'effort à accomplir doit être à la mesure de l'ampleur gigantesque des destructions et des besoins. Aussi va-t-on saisir « la monstrueuse occasion de la guerre »⁵ pour industrialiser le secteur de la construction tout entier.

Injonction

L'industrialisation du bâtiment n'est pas une idée neuve, puisqu'on peut la faire remonter à la fin du XIX^e siècle. Mais c'est essentiellement à l'issue de la Première Guerre mondiale, dans le sillage des avant-gardes fonctionnalistes, qu'elle se développe. L'usine automobile et sa chaîne de montage tayloriste représentent alors le nouveau modèle idéal de production de l'architecture qu'incarne en France un chantier comme celui de la Murette (1931-1934), à Drancy. Il faudra toutefois attendre la fin de la Libération pour que se généralisent de telles aspirations modernisatrices. C'est le moment que choisit l'État, engagé dans le redressement du pays, pour prendre en main ces questions devenues hautement stratégiques. Le signe le plus tangible est la création du ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme (MRU), le premier en France à être exclusivement consacré à l'activité du bâtiment. Désireux de stimuler la recherche et l'innovation dans le domaine de la construction, celui-ci lance une série de « chantiers d'expérience » qu'inaugurent les premiers îlots du centre reconstruit d'Orléans (1944-1949) et la cité

5. L'expression est de l'architecte Marcel Lods ; voir Marcel Lods, « Images d'Amérique », *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics (ITBTP)*, circulaire série A11, n° 177, 20 décembre 1945, p. 1-28.

expérimentale de Noisy-le-Sec (1945-1951)⁶. L'objectif est de mettre en œuvre et de comparer, à une échelle « semi-industrielle », la valeur technique et économique de différents systèmes de construction prometteurs n'ayant fait jusque-là l'objet que de prototype. Parallèlement, le MRU organise de grands concours nationaux au sein desquels se confrontent architectes, ingénieurs et entrepreneurs réunis en équipes pluridisciplinaires et dont les réalisations, toujours plus importantes, annoncent l'ère des grands ensembles.

Mobilisation

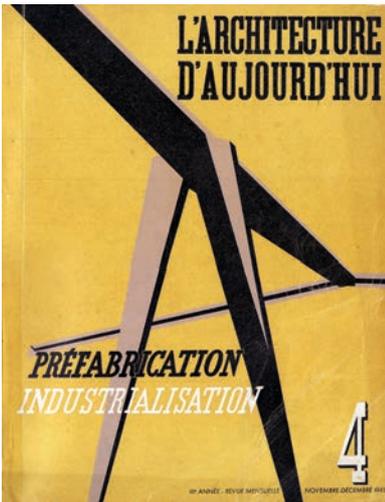
D'entre tous les aspects de l'industrialisation du bâtiment (normalisation des composants, organisation rationnelle du travail, mécanisation du chantier), la préfabrication fait l'objet d'un engouement immédiat. Alors que ni le mot, ni la chose ne sont nouveaux, elle devient un *slogan* que les différents acteurs entonnent à l'unisson. C'est bien simple, pour être authentiquement moderne, toute construction se doit désormais d'être une construction préfabriquée ! Qu'importent les surcoûts entraînés par le manque de coordination des équipes, les détériorations dues aux transports et aux manutentions successives ou encore les nombreuses malfaçons, conséquences d'une maîtrise insuffisante des techniques nouvelles, la préfabrication est devenue pour le bâtiment la condition même de sa modernisation. Son omniprésence est telle qu'elle s'applique à tous les matériaux (acier, béton, bois, pierre, plâtre, terre cuite, etc.) et à toutes les parties de la construction (structure, enveloppe, partitions, réseaux). Si rien ne semble pouvoir échapper à la préfabrication, personne non plus n'est épargné. À elle seule, elle mobilise des centaines d'inventeurs qui mettent au point pléthore de procédés. Loin d'être exclusivement une affaire d'ingénieurs, c'est davantage une pluralité d'acteurs qui participe à ce bouillonnement d'idées, représentative en cela de la mosaïque de métiers qui compose le bâtiment.

Alors que la plupart de ces procédés sont élaborés pendant la guerre, moment privilégié de réflexion et de patiente mise au point des futurs systèmes constructifs⁷, la Libération autorise leur déferlement. Entre 1945 et 1949, c'est près de 400 « matériaux nouveaux et procédés non traditionnels de construction » qui sont ainsi examinés par la Commission d'agrément du MRU. Leur diversité révèle autant l'inventivité de leurs auteurs que le raffinement de leur conception. Blocs de béton aggloméré, dalles de façade porteuses, ossatures préfabriquées, panneaux lourds, chaque procédé rivalise d'ingéniosité pour tenter, à sa manière et avec des fortunes diverses, de simplifier et de rationaliser la construction. Certaines villes reconstruites, à l'instar du Havre, offrent ainsi l'éventail le plus large des possibilités offertes par la préfabrication au lendemain de la guerre⁸.

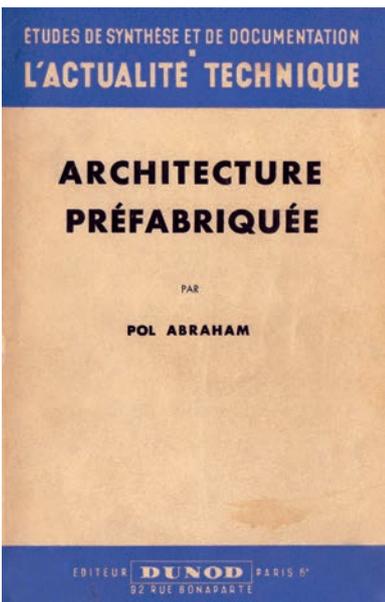
6. Voir respectivement Yvan Delemontey, « Pol Abraham à Orléans. Un chantier expérimental », *AMC Le Moniteur Architecture*, n° 207, juin-juillet 2011, p. 99-106 ; Hélène Caroux (dir.), *Réinventer la maison individuelle en 1945 : la cité expérimentale de Noisy-le-Sec*, Paris, Somogy, 2012.

7. Voir Jean-Louis Cohen (dir.), *Architecture et urbanisme dans la France de Vichy*, Paris, Éditions du Collège de France, 2020.

8. Voir Yvan Delemontey, « L'architecture de Perret à l'épreuve de l'industrialisation. La reconstruction du Havre et ses techniques constructives (1945-1959) », *Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine*, n° 20-21, mars 2007, p. 187-203.



Numéro de *L'Architecture d'aujourd'hui* (n° 4, janvier 1946) consacré à la préfabrication et l'industrialisation de la construction
(© DR)



Ouvrage de Pol Abraham : *Architecture préfabriquée*, 1946
(© DR)

Mécanique

Partagés par tous, les objectifs de la préfabrication sont clairs : abaisser le coût de la construction en rationalisant la mise en œuvre sur le chantier, accusé d'être le lieu de tous les vices avec son cortège de gaspillages et d'improvisations. Dans son numéro de janvier 1946, *L'Architecture d'aujourd'hui* tente de définir le nouveau mode de production de l'architecture : la préfabrication consiste « à exécuter d'avance des éléments ou des ensembles de telle manière qu'ils puissent être intégrés sur le chantier aux autres parties de la construction par une simple opération de montage et de liaison »⁹.

Si tout le monde ou presque s'accorde sur la nécessité de la préfabrication, la question de la manière de le faire reste ouverte : préfabriquer oui, mais préfabriquer quoi et comment ?

Alors que les Américains, les Britanniques ou même les Scandinaves identifient la préfabrication à la « maison en série », c'est-à-dire une construction légère et reproductible fabriquée intégralement en usine et assemblée sur le chantier, la notion revêt en France une autre réalité. Aux antipodes d'une « préfabrication totale » calquée de manière souvent simpliste sur le modèle de la chaîne automobile, le pays s'oriente davantage vers une « préfabrication partielle » mettant en œuvre des « éléments et ensembles préfabriqués » destinés à être intégrés dans un tout plus vaste. Cette conception, qui considère finalement le bâtiment comme un assemblage interchangeable de pièces détachées, est théorisée pour la première fois par l'architecte Pol Abraham dans un best-seller publié en 1946 et intitulé *Architecture préfabriquée*¹⁰.

Elle se révèle finalement plus en adéquation avec les faibles capacités productives de l'industrie du pays, de sa culture constructive et du goût dominant des Français en matière d'habitat, ces derniers considérant avant tout le logement comme le réceptacle des traditions, solide et pérenne, à mille lieues d'un objet mobile, fragile et éphémère.

9. P. Mesland, « La préfabrication », *L'Architecture d'aujourd'hui*, n° 4, janvier 1946, p. 3-5.

10. Pol Abraham, *Architecture préfabriquée*, Paris, Dunod, 1946.

Arguments

Quatre arguments majeurs plaident en faveur de la préfabrication. Le premier d'entre eux touche à *l'amélioration des conditions d'exécution* dans le sens d'une plus grande efficacité de la mise en œuvre sur le chantier. Pour les tenants de la préfabrication, l'exécution traditionnelle est de manière fatale une opération de mauvais rendement qu'il faut à tout prix éliminer. En concentrant la plupart des tâches en usine, c'est-à-dire en amont du processus constructif, la préfabrication fait du chantier un lieu exclusif de montage et non plus, comme avant, un lieu de fabrication avec son cortège d'improvisations, de gaspillages et d'inorganisations.

Le second argument réside dans *le supplément de qualité constructive* que doit garantir la préfabrication, aux antipodes de l'image de camelote qui lui colle à la peau. En effet, c'est en faisant un usage juste des matériaux, contrairement à la construction traditionnelle accusée de les gaspiller inutilement, et en décomposant rigoureusement les différentes parties d'un ouvrage, que la préfabrication permet de traiter la construction d'un point de vue exclusivement fonctionnel. Ainsi, par exemple, le mur traditionnel épais et lourd est-il avantageusement remplacé par une paroi composite dont chacune des parties qui la constitue est traitée (par sa forme, son épaisseur et sa matérialité) en vue de sa fonction à remplir.

Cette rationalité nouvelle qui passe par l'utilisation d'un minimum de matière conduit au troisième avantage : *l'allègement de la construction*. Ce gain pondéral est d'autant plus recherché qu'il facilite le transport et la manipulation des éléments. Il s'agit là toutefois d'un avantage contesté, et la question de la massivité des constructions en lien avec la notion de *confort* dans l'habitation est au cœur d'une controverse qui voit s'affronter, au sein même des adeptes de la préfabrication, les partisans du « mur lourd » à forte inertie thermique à ceux du « mur léger » et isolant.

Enfin, ce tableau serait incomplet si l'on omettait le quatrième et dernier argument, à savoir *la dimension sociale et morale* de la préfabrication. Puisque l'un de ses objectifs est de pallier le manque de main-d'œuvre, on lui assigne également le rôle d'attirer de nouvelles recrues plus enclines à se diriger vers les métiers de l'industrie jugés moins pénibles et plus rémunérateurs. En simplifiant et réduisant les façons sur le tas au profit d'un travail en atelier ou à l'usine, la préfabrication apparaît ainsi comme un moyen d'améliorer les conditions de vie des ouvriers. Certains, à l'instar de l'ingénieur Jean Barets, iront même jusqu'à voir dans cet heureux transfert un moyen efficace de lutter contre l'alcoolisme¹¹.

Substitutions

Avant de décrire les modalités et les formes que prend à cette époque le béton assemblé, il n'est pas inutile d'évoquer les logiques de *substitution* qui s'épanouissent au lendemain de la guerre en lien avec la préfabrication.

11. Voir Jean Barets, « La préfabrication lourde », *Annales de l'ITBTP*, n° 96, décembre 1955, p. 1287-1318.

La raréfaction des matières premières, comme celle des matériaux, impose en effet de ne négliger aucune piste et de miser sur la diversité des moyens de construire. En l'absence de ciment, d'acier ou de bois, d'autres matériaux dits « de remplacement » comme la terre, la pierre ou le plâtre, vont jouer un rôle qu'ils n'avaient plus depuis longtemps. Quoi de plus simple, de plus rapide et de moins coûteux pour abriter les sinistrés que d'employer les matériaux naturellement trouvés sur place et existant en abondance sur le territoire ? Ils ont non seulement l'avantage d'être immédiatement disponibles, mais aussi de ne nécessiter que le minimum d'énergie pour leur transformation, leur transport et leur mise en œuvre sur le chantier (ce qu'on appelle aujourd'hui plus communément l'énergie grise). Toutefois, reconsidérer l'emploi de matériaux tombés en désuétude ne suffit pas à répondre à l'urgence et à la gravité du moment, encore faut-il les adapter aux conditions de production actuelles.



Publicité pour la Société française de la pierre normalisée et prétaillée (SFPNP), exploitant les machines mises au point par Paul Marcerou

(© DR)

Il en va ainsi de la pierre tendre calcaire présente sur la quasi-totalité du territoire français. L'abaissement de son prix de revient et l'amélioration de sa commodité d'utilisation sont obtenus grâce à des recherches engagées pendant la guerre mettant en évidence les propriétés physiques et mécaniques du matériau, ainsi que par le choix d'un petit nombre de blocs standards. Dès cette époque, l'État soutient l'équipement d'une carrière pilote installée à Bonneuil-en-Valois, près de Paris, en vue d'une production mécanisée de quelque 20 000 m³ de blocs par an. Extraite et débitée selon ces méthodes nouvelles, la pierre ainsi livrée sur les chantiers est une pierre dite « prétaillée », c'est-à-dire dont les six faces sont sciées avec précision et dont le parement extérieur est destiné à rester apparent, excluant toute opération de ravalement ultérieure. Poursuivis et amplifiés à la Libération, ces efforts ouvrent la voie à une mécanisation véritablement industrialisée des carrières de pierre de taille dont Paul Marcerou, génial carrier et ami de l'architecte Fernand Pouillon, sera la cheville ouvrière dans les années 1950.

Les machines qu'il met au point et installe à la carrière de Fontvieille, près de Marseille, sont capables de tailler dans la masse des blocs plusieurs traits de sciage de parallélisme régulier avec une qualité de parement et des dimensions rigoureuses. Dotées d'une capacité de production atteignant les 10 000 m³ par mois, elles alimentent à des prix défiant toute concurrence la plupart des chantiers de la région parisienne à la Normandie, du sud de la France à l'Afrique du Nord¹².

¹². Voir Yvan Delemontey, « Quand la pierre se rêvait en rivale du béton au lendemain de la Seconde Guerre mondiale », *Monumental*, 2019/1, p. 62-67.



Illustration d'un cycle de construction modulaire, de l'usine au chantier

(Source : Modulmatik)

Les enjeux de l'industrialisation

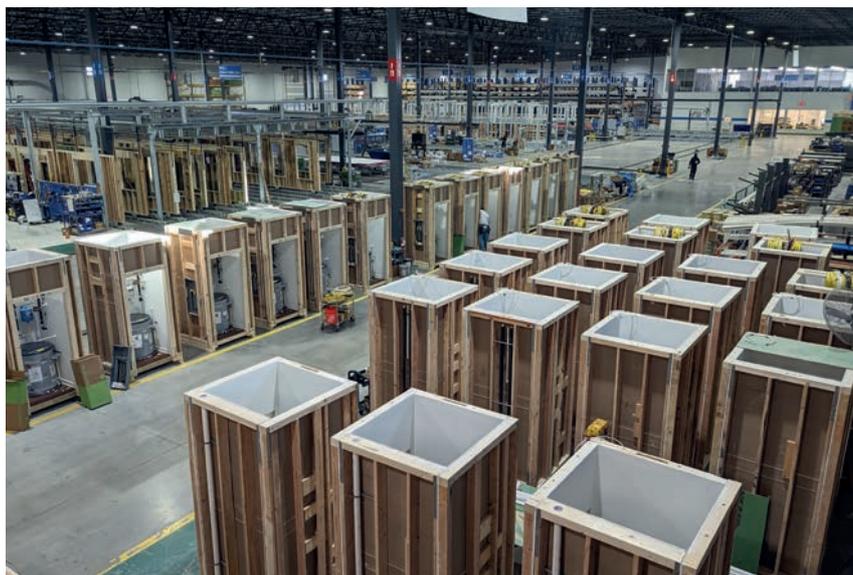
Pour assurer une parfaite compréhension du sujet, il convient de dissocier les notions de « préfabrication » et « d'industrialisation ». La préfabrication consiste à transférer une partie de l'acte de construire en usine dans un « chantier couvert » sans disruption profonde des organisations et méthodes traditionnelles. L'industrialisation induit quant à elle des notions de systèmes multi-corps d'état, de gammes, de production en série, et la réussite de son déploiement implique généralement une modification des processus classiques de conception, d'achat et de construction. C'est ce que les anglo-saxons appellent le « DfMA »⁸, et qui s'avère indispensable si l'on souhaite exploiter pleinement les bénéfices de l'industrialisation et optimiser le triptyque coût, qualité, délais.

La préfabrication répond majoritairement à une logique de « sur-mesure » et l'industrialisation s'inscrit davantage dans une logique de produits et systèmes standardisés. Il ne peut pas y avoir de réelle démarche d'industrialisation sans répétitivité. L'un des enjeux fondamentaux est donc la capacité à créer du volume et de la répétitivité dans les projets. Mais répétitivité ne veut pas nécessairement dire uniformité.

La demande n'étant aujourd'hui pas suffisamment structurée face à cette nouvelle logique de conception centrée autour des « produits/systèmes », l'écosystème français d'industriels hors-site reste encore relativement immature et contraint à naviguer entre préfabrication (avec la culture traditionnelle du sur-mesure) et une industrialisation partielle de ses process, afin de pouvoir répondre à l'hétérogénéité de la demande⁹.

⁸. Le DfMA (pour *Design for Manufacturing and Assembly*), ou conception pour la production et l'assemblage en français, est un ensemble de règles de conception d'un produit. Ces règles permettent de tenir compte des contraintes de production et d'assemblage, afin de faciliter ces étapes lors du travail de conception. L'objectif de ces règles est de réduire les coûts de production et d'assemblage et améliorer la qualité.

⁹. La majorité des consultations de nouveaux projets faites auprès des industriels modulaires français nécessite un important travail d'adaptation et d'ingénierie du fabricant modulaire. Peu de demandes s'appuient sur des gammes de modules génériques déjà développées.



Usine de production de composants industrialisés. Modules techniques au premier plan et murs à ossatures bois (MOB) au second plan
 (© William Grothmann – Blueprint Robotics)

***Kit-of-parts* et plateformes produits**

L'une des conditions à la massification de l'emploi de systèmes constructifs industrialisés serait donc la nécessaire réorganisation d'une partie de la chaîne de valeur et une refonte de la manière dont ses acteurs interagissent.

À l'instar de Modulous, 369 Pattern Buildings, CREE, Corner, ou Sylva (by Stora Enso), nous voyons émerger depuis plusieurs années de nombreuses initiatives (avec plus ou moins de succès¹⁰) visant à développer une logique de *Kit-of-Parts*¹¹. Parallèlement, nous constatons le développement de « plateformes produits »¹²

10. Modulous et Corner sont entrés en procédure de redressement judiciaire en 2023.

11. "Kit-of-parts" est un ensemble d'éléments de construction discrets qui sont préconçus et conçus pour être assemblés de diverses manières afin de définir un bâtiment fini. Étant donné qu'un élément bien conçu peut être produit en série et utilisé à maintes reprises, les processus de fabrication peuvent être élaborés à l'avance pour la fabrication en temps réel et l'assemblage automatisé. – "Kit-of-Parts: A Review of Object-Oriented Construction Techniques", A. Scott Howe, Ismau Ishii, Tomohiro Yoshida.

12. « Les plates-formes de produits peuvent être définies comme suit : L'ensemble des pièces, des processus de production associés, les connaissances, les personnes et les relations nécessaires pour réaliser tout ou partie des projets de construction en utilisant une approche par plate-forme. Une plate-forme de produits fournit un noyau stable qui est configuré et combiné avec des composants complémentaires (*via* des interfaces définies) en fonction d'un projet particulier. Une plate-forme de produits comprend également les processus, les outils et l'équipement nécessaires à l'assemblage, outils et équipements nécessaires à l'assemblage. Les plates-formes de produits ne sont donc pas des bâtiments, mais des composants, des processus ou des connaissances communs, appliqués pour fournir une gamme d'actifs distincts (qui peuvent aller de pièces spécifiques à des bâtiments entiers) de manière efficace grâce à des économies d'échelle et de gamme. » The product platform rulebook – mars 2023 – <https://constructioninnovationhub.org.uk/our-projects-and-impact/platform-programme/rulebook/>

(Seismic, Kope, Modulize...) dont le principe semble être un levier intéressant pour la structuration de cet écosystème de composants industrialisés (possiblement paramétriques¹³). Cela se fait notamment grâce à la capacité des « plateformes » à définir des *référentiels* et des *standards* pour chacune des familles de composants, garantissant ainsi leur *interopérabilité*¹⁴, centralisant les données et les rendant accessibles au plus grand nombre.

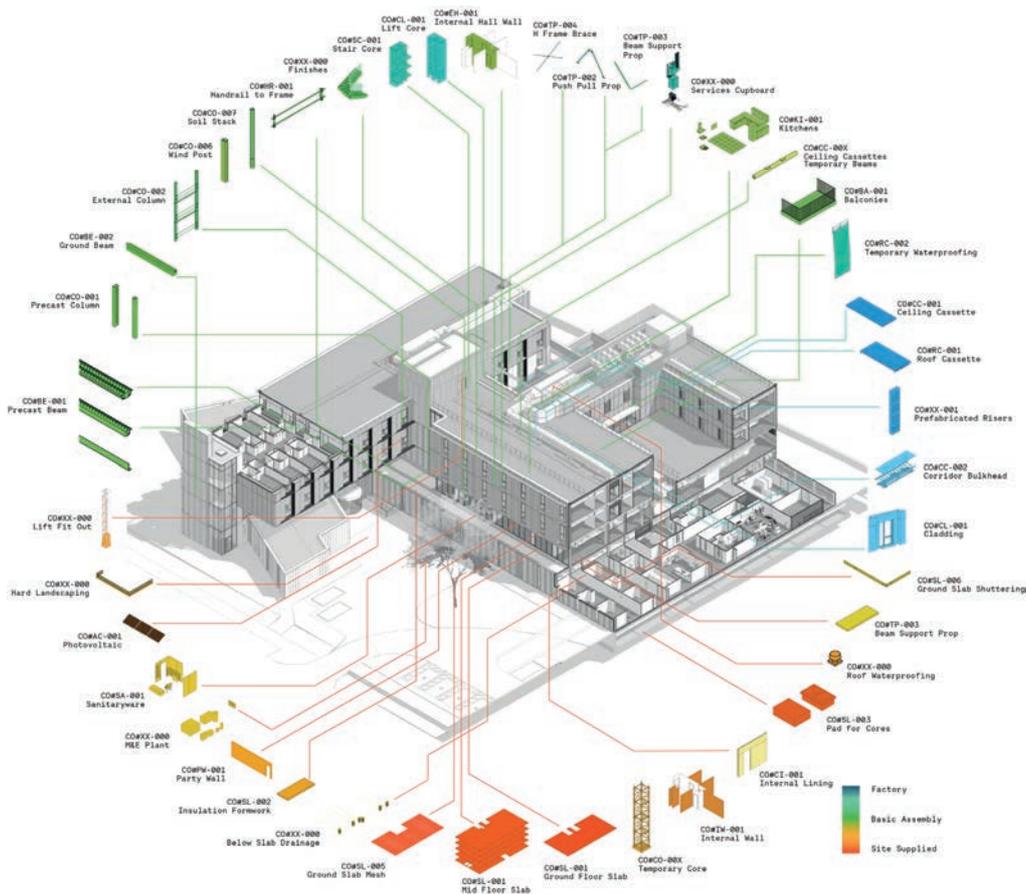


Illustration d'un écosystème de composants au sein d'un bâtiment
(Extrait du rapport "Delivery Platforms for Government assets", Bryden Wood)

13. Le caractère paramétrique de certains composants industrialisés permet d'adapter la géométrie des systèmes à différents contextes, sans remettre en cause le haut niveau d'industrialisation de fabrication du système.

14. L'interopérabilité s'avère être un facteur essentiel de la flexibilité de conception et de l'hétérogénéité architecturale. En développant des systèmes ouverts et interopérables, le champ d'action du concepteur ne se limite plus à un système constructif unique mais possiblement à une infinité de combinaisons.

L'industrialisation face au nécessaire ancrage local

La France regroupe des zones climatiques variées, chacune associée à une importante diversité architecturale et un fort ancrage territorial. Néanmoins, la création d'éléments duplicables est l'enjeu principal de l'industrialisation dans un écosystème de la construction où chaque bâtiment est un prototype qui s'inscrit dans un cadre donné.

Dans ce contexte, une réponse constructive unique apparaît donc comme peu pertinente à l'échelle nationale. La question de fond est donc la suivante : « Comment inscrire durablement un écosystème de systèmes constructifs industrialisés dans un contexte local aux enjeux architecturaux et climatiques variés ? ».

Pour répondre à cette question, il semble intéressant d'imaginer la structuration d'un écosystème de « composants » dissociés (briques constructives), qu'ils soient des *composants intérieurs* (#CORE), ou des *composants d'enveloppe* (#SKIN).

D'un côté, nous avons des « composants intérieurs » qui ne jouent pas de rôle dans l'architecture extérieure et peu dans la résilience climatique du bâti.

Cette famille pourrait alors être décomposée en sous-éléments regroupant des composants :

- « structures » : poteaux, poutres, dalles, murs... ;
- « techniques » (non visibles) : gaines techniques, modules techniques, pieuvres hydrauliques/électriques, gaines d'ascenseur... ;
- « usages » : composants « visibles » ayant un impact direct sur l'usage et la fonctionnalité de l'ouvrage : module de salles de bains, module de WC, module de cuisines, cage d'escaliers, systèmes de cloisonnement intérieurs évolutifs (agencement, cloisons amovibles...);
- « modulaires » : modules 3D structurels regroupant tout ou partie des caractéristiques des composants Structure, Techniques et Usages.

Comme ces composants ne sont pas impliqués dans la conception de l'enveloppe et influent peu sur la performance du bâti, il semble possible d'imaginer des standards déployables sur l'ensemble du territoire.

De l'autre côté, nous avons des « composants d'enveloppe » (#SKIN) fortement impliqués dans les enjeux architecturaux et climatiques de l'ouvrage.

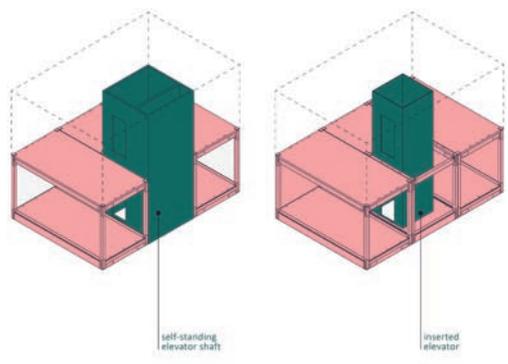
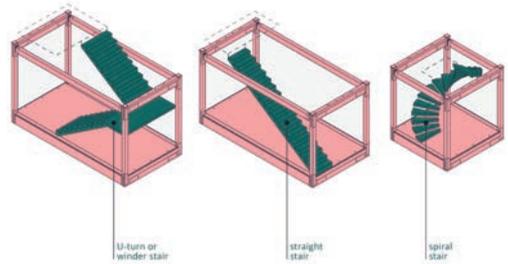
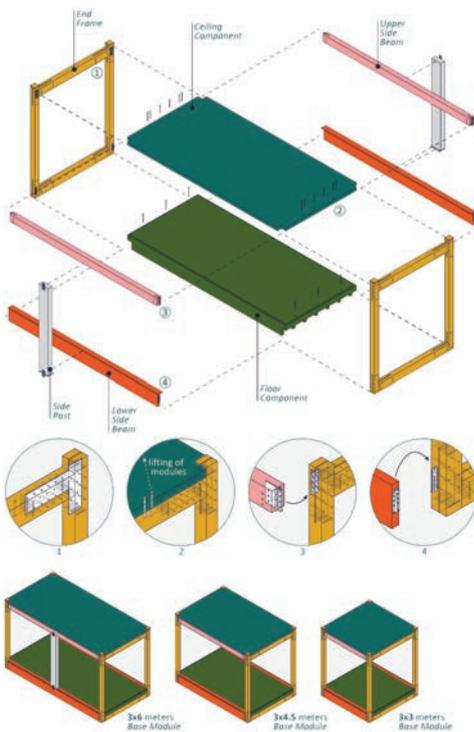
Cette famille pourrait être alors décomposée en sous-éléments regroupant des composants :

- « façades » (architecturées et s'appuyant sur de nouvelles formes et matérialités) ;
- « toitures » : toitures en pente, toitures plates, toitures terrasses... ;
- « circulations » : notamment coursives, passerelles et escaliers extérieurs ;
- « agrémentation » : balcons, loggias, attiques...



Exemple de plateforme de composants

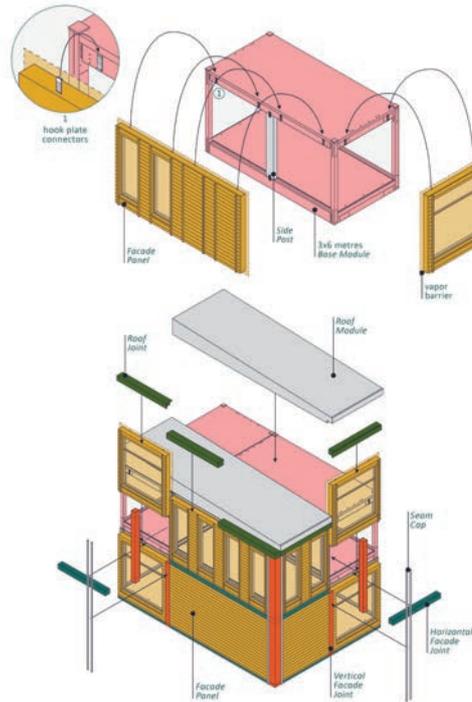
(Source : L&Q (UK))



Exemple de composants « intérieurs »

(Source : 3Cycle Modular, basé sur le système 369 Pattern Buildings)

À l'inverse des composants intérieurs, la standardisation de ces composants d'enveloppe semble plus complexe tant les enjeux architecturaux et climatiques varient localement. Ces composants pourraient d'ailleurs être également mis en œuvre dans le cadre d'opérations de réhabilitation.



Exemple de composants « enveloppe »

(Source : 3Cycle Modular, basé sur le système 369 Pattern Buildings)

L'industrialisation, levier de massification des systèmes constructifs mixtes bio- et géosourcés ?

Les fournisseurs de solutions constructives industrialisées, qui proposent aujourd'hui des solutions « Hors-site »,¹⁵ s'appuient majoritairement sur des matériaux biosourcés¹⁶ (filière bois notamment) et mettent en œuvre des techniques constructives en filières sèches¹⁷ souvent associées à de la construction

15. Les solutions « Hors-site » regroupent différents systèmes constructifs tels que les ossatures 1D, les panneaux 2D, le modulaire structurel 3D et les composants non structurels. Pour plus de détails : « Référentiel de la construction Hors-site » – Groupe de travail 3F/GPA/SGP.

16. Les matériaux biosourcés, qui sont des matériaux partiellement ou totalement issus de la biomasse d'origine végétale ou animale, tels que le chanvre, le lin, le colza, le kénaf, le miscanthus, la moelle de tournesol, la balle de riz, la paille, le liège, la laine de mouton, etc.

17. La filière sèche est une méthode de construction qui n'utilise pas d'eau. L'absence d'eau dans les processus de fabrication supprime une grande partie des temps de séchage et permet de maximiser la productivité en usine.

dite « légère ». Ces techniques constructives souffrent généralement d'un manque de déphasage thermique lié à leur faible masse. La gestion du confort d'été et des pics de chaleurs deviendra (si ce n'est pas déjà le cas) l'un des critères de conception prédominant des bâtiments de demain. Le déploiement à grande échelle de ces solutions constructives légères peut donc légitimement interroger quant à la résilience climatique de ces bâtiments.

À l'inverse de ces solutions majoritairement biosourcées, les matériaux géosourcés¹⁸, denses et massifs, présentent d'excellentes propriétés mécaniques, acoustiques et hygrométriques¹⁹ (la terre stocke l'humidité et la libère en cas d'air trop sec). Ces techniques constructives ancestrales et fortement régionalisées restent cependant difficiles à massifier à l'échelle nationale : leur production est localisée et leur masse intrinsèquement élevée impacte les moyens de levage et de transport nécessaires à leur manutention. Ces matériaux semblent plus que jamais retrouver une seconde jeunesse et s'inscrivent à la perfection dans les besoins des prochaines décennies de la construction : forte capacité de déphasage thermique, exploitation de ressources locales, faible niveau de transformation, circularité accrue...

Les matériaux biosourcés ont de leur côté déjà amorcé un retour en force, notamment grâce à la structuration de filières efficaces. À l'instar du bois, de la paille ou du chanvre, ces matériaux s'inscrivent déjà dans le paysage de la construction actuelle et leur application commence à être bien encadrée au niveau réglementaire²⁰.

Comme tout procédé constructif innovant – ou du moins non couramment mis en œuvre –, il existe de forts enjeux d'assurabilité. Ces matériaux bio- et géosourcés amènent avec eux de nouveaux risques liés à leur nature brute et notamment à cause de leur sensibilité à l'eau et à l'incendie. La gestion de ces risques induit un besoin accru d'expertise en phase de conception et de mise en œuvre²¹ et, malgré un important patrimoine ancien construit avec ces techniques, ces savoir-faire « artisanaux » se sont érodés avec le temps.



Pose de blocs de pisé préfabriqués en façade d'un bâtiment

(Source : Projet « Quatre Cheminées », Déchelette Architecture, Boulogne Billancourt ; © Salem Mostafaoui)

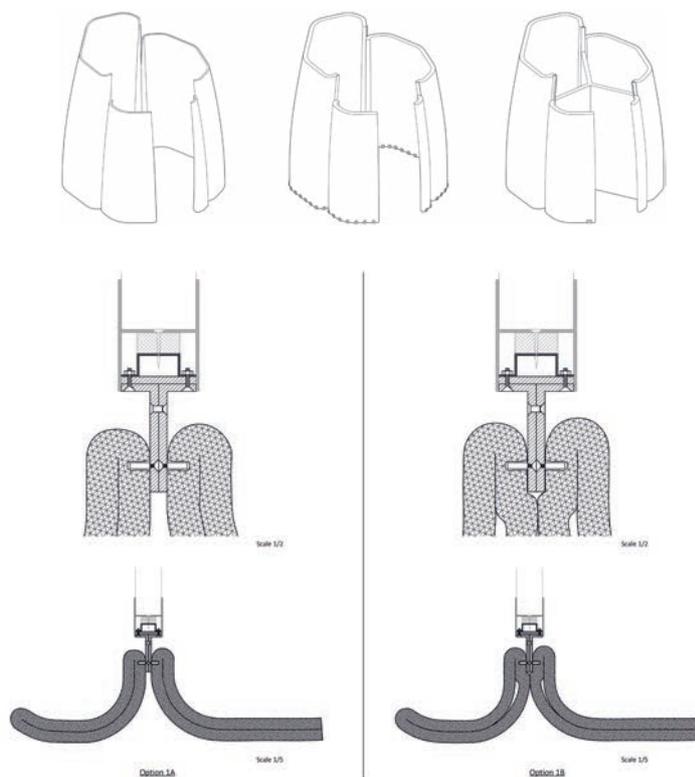
18. Les matériaux géosourcés sont des matériaux d'origine minérale demandant peu de transformation, tels que la bauge, le pisé, la terre crue, le torchis, etc.

19. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/pole-acoustique-thermique-materiaux-bio-geo-sources-biogen>

20. Listing du corpus normatif en vigueur : <https://normalisation.afnor.org/thematiques/materiaux-biosources-construction/>

21. La conception de bâtiments ayant recours à des systèmes d'enveloppe biosourcée induit généralement un travail plus important sur les différentes sciences du bâtiment (incendie, acoustique, thermique, structure...) par rapport à une conception dont l'enveloppe est réalisée en béton armé.

Le projet de rénovation de centre commercial *KaDeWe* à Berlin, qui impliquait la participation d'architectes et d'artistes, notamment l'agence Ciguè chargée de concevoir des cabines d'essayage, a permis d'explorer cette seconde approche.



Axonométrie des cabines *KaDeWe* et détail d'assemblage

(© Bollinger+Grohmann)

Chaque cabine est constituée de panneaux muraux préfabriqués *ex situ* et imprimés en 3D en une seule fois. L'impression hors-site, indépendante des conditions météorologiques, a permis d'optimiser les panneaux au flambement avec précision en faisant varier verticalement l'épaisseur de 6 à 4 cm, avec une épaisseur maximale dans la zone de connexion entre les panneaux pour assurer la longueur d'installation minimale des vis à béton. La flexibilité et la précision du robot ont permis d'adapter localement, au droit des assemblages, l'épaisseur de matière nécessaire pour les optimiser.

Néanmoins, le défi majeur relevé lors de ce projet concerne les connexions entre les éléments imprimés, qui se font à l'aide de colles structurales, de profilés et de vis en acier, assurant ainsi la liaison entre la structure interne et les profilés en acier. L'impression hors-site requiert très en amont de la conception de réfléchir aux détails d'assemblages moteurs de la solidarisation de l'ouvrage. D'autres défis

concernent la logistique : chaque module imprimé doit être capable d'être transporté par camion et les conditions d'accès et moyens de levage sur site doivent être réfléchis en amont.

Liberté de forme et optimisation topologique

Si les applications en impression 3D sont à ce jour encore limitées, c'est en partie en raison de la faible résistance à la traction des matériaux imprimés, qui sont non armés et donc incapables de résister correctement en flexion. Certaines entreprises comme XtreeE, en partenariat avec le CNRS et l'École des Ponts, travaillent aujourd'hui sur la coextrusion de fibres longues lors du processus d'impression du matériau et l'adaptation de la tête d'impression afin de renforcer le matériau imprimé à la traction⁸. D'autres, comme le professeur Harald Kloft de la TU Braunschweig, s'intéressent au développement de béton projeté imprimé en 3D directement sur les armatures⁹. Aujourd'hui, c'est plus généralement dans les cavités formées entre deux parois imprimées que sont intégrés des renforts hybrides formés par le mortier imprimé en 3D et le béton armé de remplissage local.

Un partenariat entre Bollinger + Grohmann, SIKA, le Centre de R&D d'Eiffage, l'Université de Cergy Pontoise et le CERIB a permis de concevoir une passerelle composite avec un béton imprimé en 3D et un remplissage en BFUP (béton fibré à ultra haute performance) sur le canal Saint-Denis. La recherche topologique de l'ouvrage a permis d'optimiser la matière et de réduire les armatures requises pour reprendre des efforts en traction-flexion.

L'approche structurelle de l'ouvrage de franchissement consiste en un assemblage de coques nervurées en béton imprimées hors-site, chacune adaptée à son emplacement dans l'ouvrage, et inspirée du système traditionnel de voussoirs. La section transversale de la passerelle est conçue comme une dalle mince raidie par des nervures bidirectionnelles.

Les nervures longitudinales, globalement optimisées, ont une géométrie variable et contiennent des câbles de post-contrainte enveloppés d'une matrice fibrée à ultra haute performance. La post-contrainte vise à maintenir la structure en compression, évitant ainsi toute fissuration sous charges caractéristiques. Les nervures transversales, positionnées sur les lignes de force à la manière des travaux de Pier Luigi Nervi, contribuent à rendre la section transversale indéformable. La méthode constructive implique l'impression *in situ* des coques, assemblées au sol par post-contrainte avec le remplissage interstitiel en BFUP.

8. <https://www.lesechos.fr/pme-regions/ile-de-france/impression-3d-xtreee-developpe-une-alternative-au-beton-arme-1983041>

9. Conférence Concrete 3D Printing de Harald Kloft au BE-AM Symposium en 2019 à Frankfurt : <https://www.youtube.com/watch?v=egH9s99uX2c>

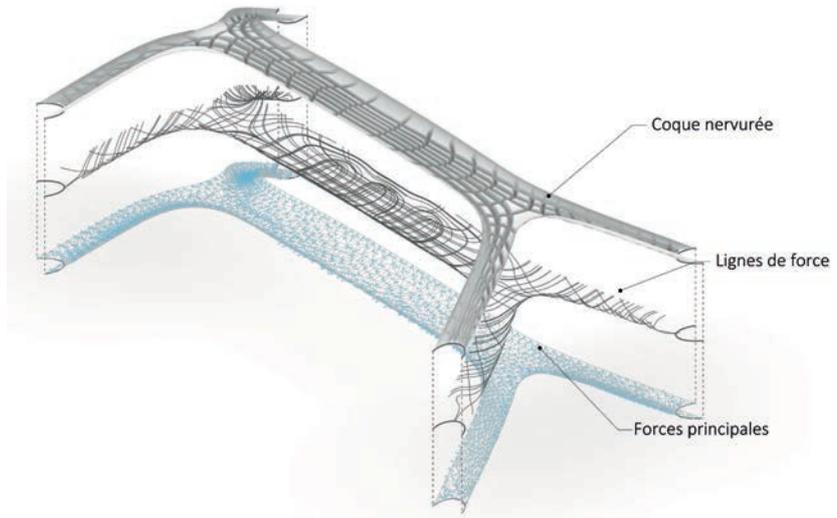
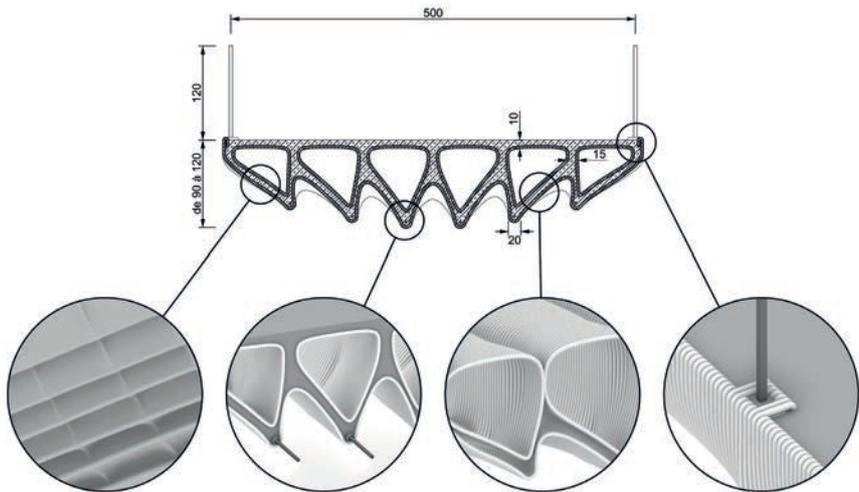
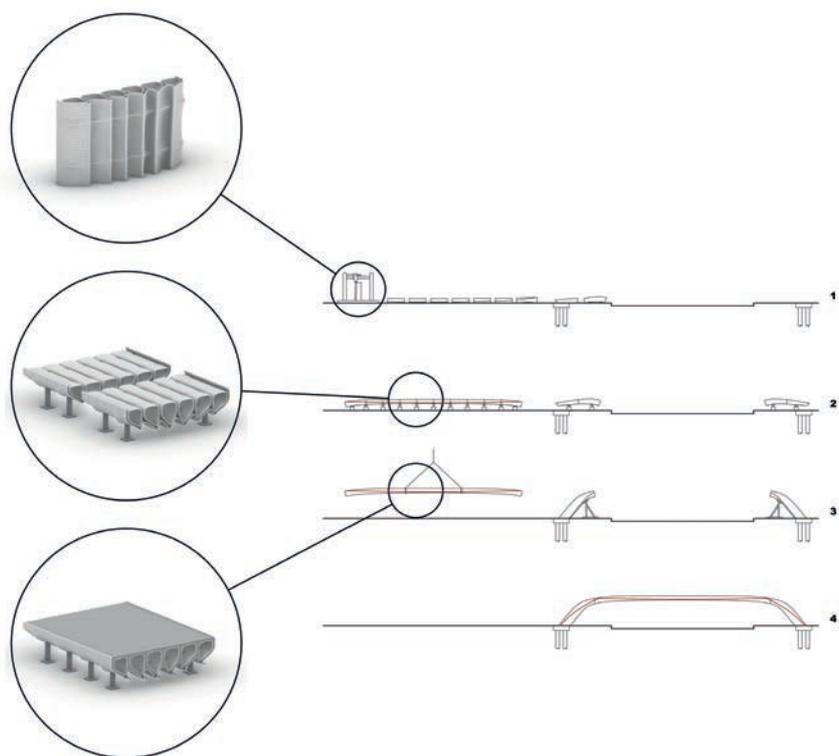


Schéma d'optimisation topologique des nervures de la passerelle Canal Saint-Denis
 (© Bollinger+Grohmann)



Section transversale de la passerelle, raccord entre les coques, gaine de post-contrainte, nervure, ancrage des garde-corps
 (© Bollinger+Grohmann)



Méthode constructive

1. Impression des coques nervurées.
 2. Assemblage des coques par post-contrainte.
 3. Pose du tablier 4 et connexion culées-tablier.
- (© Bollinger+Grohmann)

À l'inverse des structures traditionnelles en béton, où le positionnement de la matière est contraint par la question des coffrages dans une recherche de simplicité géométrique et de répétitivité, la technologie du béton imprimé en 3D permet de réaliser des formes très complexes, non répétitives, offrant une flexibilité dans le positionnement du matériau pour répondre aux contraintes mécaniques et donnant lieu à une optimisation de la matière.



Essais topologiques de murs pour le projet Villiaprint chez XtreeE, 2018

(© Bollinger+Grohmann et © XtreeE)

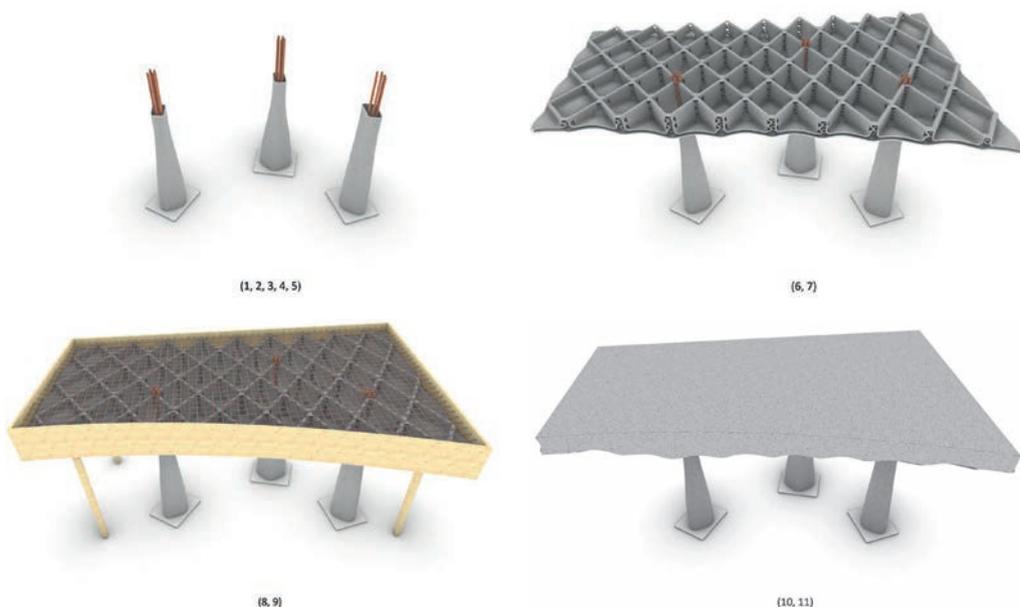
De l'expérimentation à la diffusion des connaissances

Le principal frein au déploiement de la technologie à grande échelle est l'incapacité à appréhender le comportement des matériaux imprimés en 3D en flexion. La réglementation, la certification des matériaux et la nécessité de s'adapter aux

normes et aux standards de construction existants dans chaque pays, doivent encore être résolus. Des tests normatifs et des facteurs de sécurité doivent être définis en tenant compte de la rhéologie, des cinématiques d'impression et du comportement orthotrope du matériau.

La recherche scientifique est le principal levier pour encourager les industriels à passer à la pratique, à tester leurs matériaux et à initier de nouvelles normes applicables.

En partenariat avec KET, HENN et SIKA, une approche de conception performative pour la fabrication de systèmes de dalles de plancher imprimées en béton tridimensionnel 3DCP – *3D Concrete Printing* – a permis d'explorer l'optimisation topologique d'un plancher à la fois d'un point de vue structurel et acoustique. D'un point de vue structurel, le système, adapté à l'enveloppe du moment de flexion, a permis de réduire le volume de béton et donc son empreinte carbone de 36 % par rapport à une dalle pleine. D'un point de vue acoustique, une série de motifs géométriques dans le volume a été étudiée et a permis de se passer de plafonds suspendus acoustiques qui réduiraient la hauteur libre sous plafond.



Système de dalles 3DCP
(© KET et Bollinger+Grohmann)

Pour passer des sciences à la pratique, un système de plancher inspirée de cette innovation est en cours de développement dans le cadre du projet de la Citadelle des Savoir-Faire et laisse entrevoir un plus large développement à l'échelle industrielle.

Le Stream Building (PCA-STREAM, 2023¹) est un bâtiment à haute mixité d'usage, conçu dans le cadre de l'appel à projets urbains innovants « Réinventer Paris » en 2014, qui réunit dans une même enveloppe bureaux, hôtel, restaurants, commerces, toiture agricole et micro-brasserie. Il offre un cas d'étude de construction hors-site pour trois de ses composants : la structure mixte bois/béton, les blocs de façade et les modules de salles de bains de l'hôtel. La réalisation d'analyses de cycle de vie aux différentes phases du projet² a permis de quantifier son empreinte carbone et d'obtenir le niveau E2C1 du label E+C- (E2 : niveau Énergie 2, diminution d'au moins 15 % des consommations énergétiques du bâtiment par rapport à la demande réglementaire. C1 : niveau Carbone 1, limitation des émissions de gaz à effet de serre liées au projet à 1 625 kCO₂, éq/m²_{SDP}).

Cette étude propose d'évaluer les apports réels de la préfabrication à ce projet *via* une comparaison avec des procédés de fabrication sur site. Les résultats de l'étude E+C- ont été repris pour les composants préfabriqués mis en place dans le projet et l'empreinte des variantes comparatives a été calculée en utilisant la méthode d'analyse de cycle de vie « statique » (Norme ISO 14040).

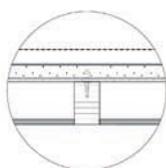
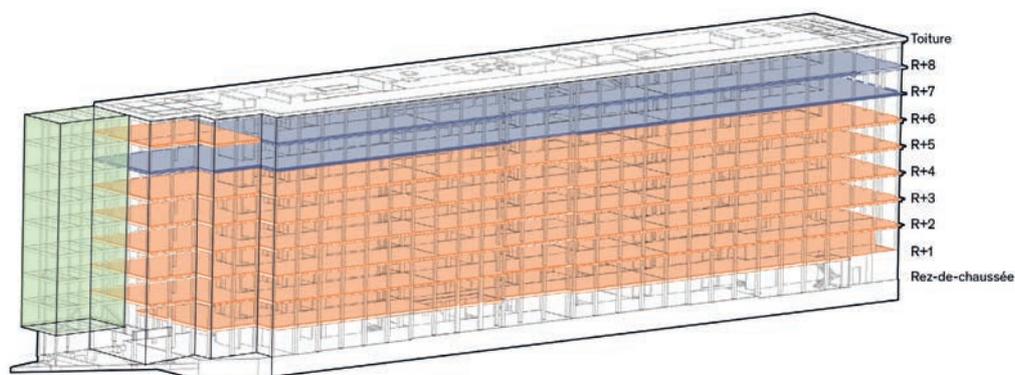


Stream Building
(© Salem Mostefaoui pour PCA-STREAM)

La structure du Stream Building

Le projet du Stream Building met en œuvre une structure mixte bois-béton (60 %–40 %) : le béton est utilisé pour la travée centrale, les noyaux et les escaliers, le bois pour les poteaux et « l'exosquelette » (structure externe prolongeant le bâtiment). La composition des planchers mixtes diffère selon les zones programmées.

1. 6, avenue de la Porte de Clichy, Paris 17^e.
2. Par le bureau d'études environnementales Deerns.



Bureaux
Solives en bois lamellé-collé
Dalle en béton armé



Hôtel
Panneaux en bois CLT
Chape de béton acoustique

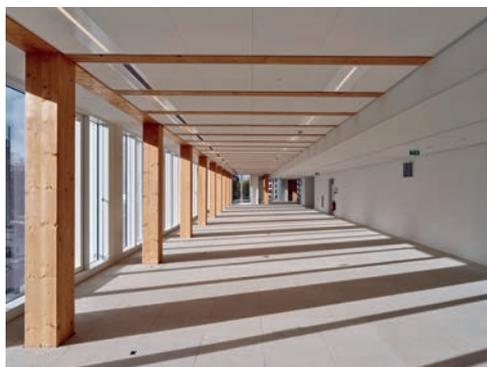
Exosquelette

Répartition programmatique et structurelle du Stream Building

(© PCA-STREAM)

La structure intérieure est en bois scandinave. Les poteaux et poutres en lamellé-collé sont fabriqués à Sélestat en Alsace (à 450 km du projet). Les planchers sont usinés près de Nantes (à 400 km). L'exosquelette est réalisé avec du Douglas français provenant du Jura et des Vosges (à 450 km). Le béton est quant à lui coulé sur site.

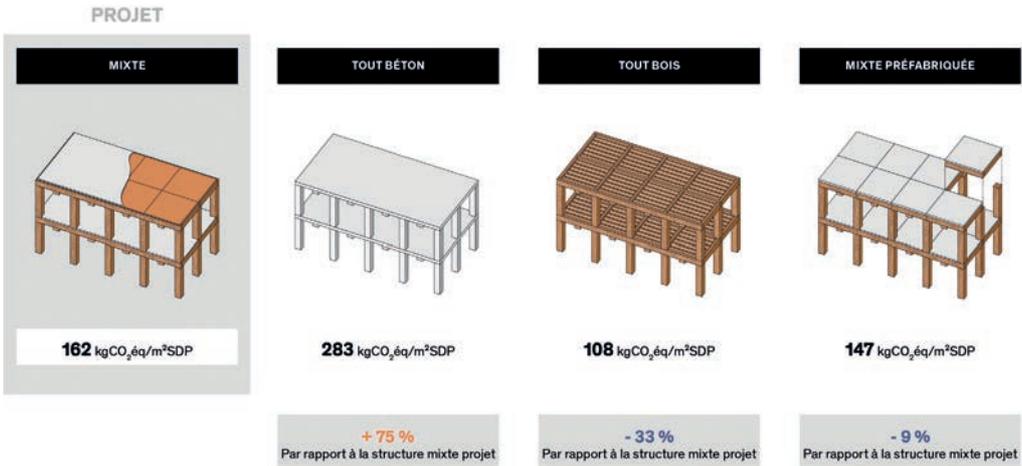
Dans le cadre de cette recherche, nous avons comparé la structure mise en œuvre dans les étages de bureaux (solives en bois lamellé-collé + dalle en béton armé) à trois scénarios alternatifs : une structure en béton coulée en place, une structure préfabriquée entièrement en bois et une structure préfabriquée mixte pour laquelle le complexe de plancher bois-béton serait également préfabriqué. La trame (3,3 m × 3,6 m) et la portance sont identiques pour l'ensemble des scénarios.



Stream Building, étage de bureaux

(© Jean-Philippe Mesguen pour PCA-STREAM)

Le permis de construire du Stream Building ayant été déposé en 2019, le bâtiment n'a pas été soumis à la « Doctrine pour la construction des immeubles en matériaux biosourcés et combustibles » publiée en juillet 2021 par la Brigade des sapeurs-pompiers de Paris, qui donne obligation aux bâtiments de plus de 18 m de haut d'encapsuler les éléments de structure ou de mettre en place une protection incendie à l'aide de « sprinklage ». Le Stream Building fait partie de la dernière génération de bâtiments avec une structure bois apparente.



Comparaison du poids carbone incorporé des quatre types de structure : mixte (projet), tout béton, tout bois, mixte préfabriquée

(© PCA-STREAM)

De manière prévisible, la structure béton est la plus carbonée (+75 % par rapport au projet mis en œuvre), alors que bois permet de réduire de 33 % le poids carbone du projet. Les proportions de matériaux sont toutefois très différentes dans ces trois scénarios, et le bois est nécessairement préfabriqué, ce qui rend difficile de tirer des conclusions quant à l'impact de la préfabrication sur l'empreinte environnementale.

Nous pouvons en revanche examiner l'impact d'un degré de préfabrication supérieur à la structure mise en œuvre. Ce quatrième scénario intègre des planchers mixtes pour lesquels le béton n'est pas coulé sur site mais préfabriqué en usine, les planchers composites étant ensuite directement livrés sur site. Ce scénario permet une diminution de 9 % du poids carbone par rapport au projet mis en œuvre.

CONSTRUIRE HORS-SITE

Méthodes • Outils • Retours d'expériences

Le secteur de la construction a un impact environnemental négatif, en étant notamment source d'émissions de gaz à effet de serre et de nombreux déchets.

La construction hors-site, également appelée « préfabrication », est une alternative aux méthodes traditionnelles du chantier. Bien que cette approche puisse sembler récente, elle résulte en réalité de plusieurs décennies de réflexions et d'expérimentations.

Aujourd'hui, la construction hors-site connaît un renouveau et suscite de nouveaux débats, remettant en question à la fois les pratiques de chantier et les concepts architecturaux.

Cet ouvrage propose d'envisager la construction hors-site comme une solution pertinente autant pour les bâtiments neufs que pour la rénovation des bâtiments existants. Il s'articule autour de quatre parties, qui successivement :

- retrace son histoire, parfois controversée, sous l'angle des enjeux environnementaux ;
- détaille la modernisation des méthodes de conception et de production, qui intègrent désormais des matériaux bio- et géosourcés ;
- expose les outils robotiques et digitaux disponibles et en cours de développement en France, en Suisse, en Allemagne et au Japon ;
- enfin, met en lumière des cas pratiques fondés sur les expériences d'architectes praticiens.

Cet ouvrage offre aux architectes des clés pour repenser leurs pratiques, en intégrant les avantages de la préfabrication tout en explorant de nouvelles esthétiques et typologies adaptées aux enjeux actuels. Il propose aux maîtres d'ouvrage des solutions concrètes pour optimiser les délais, maîtriser les coûts et réduire l'impact environnemental de leurs projets grâce à la construction hors-site. Pour les maîtres d'œuvre, l'ouvrage fournit une vue d'ensemble des outils, matériaux et méthodologies modernes permettant de coordonner efficacement les acteurs et garantir une exécution de haute qualité.

Cet ouvrage rassemble, autour de quatre parties, 19 articles d'enseignants-chercheurs, doctorants, professionnels, ingénieurs et architectes, issus du colloque « La Construction hors-site face à l'anthropocène », organisé par le LéaV, laboratoire de l'ENSA de Versailles, Immobilière 3F et la Maison de l'architecture Île-de-France, qui a accueilli l'événement les 19 et 20 octobre 2023.

Sous la direction de Stéphane Berthier et Eva Madec

Les contributeurs : Andrea Bassi, Stéphane Berthier, Thomas Bock, Jean-François Caron, Angéline Chartier, Pascal Chazal, Julien Delayre, Yvan Delemontey, Inès Delépine, Pauline Detavernier, Guillaume Duranel, Max Eschenbach, Corentin Fivet, Romain Gérard, Christoph Kuhn, Margotte Lamouroux, Eva Madec, Samim Mahdizadeh, Pierre Marquis-Lhuillier, Romain Mesnil, Camille Ouvrard, Margot Pellegrino, Antoine Perron, Klaas de Rycke, Philippe Rizzotti, Susanne Stacher, Ingrid Taillandier, Oliver Tessmann, Sébastien Truchot, Laelia Vulot, Marios Vekinis, Anne-Kristin Wagner, Carole Wernert.


Groupe ActionLogement


maison de
l'architecture
ARCHITECTURE - INTERIORS - PAYSAGE
ÎLE-DE-FRANCE

École nationale
supérieure d'architecture
Versailles

LéaV
laboratoire de recherche
ENSA Versailles

ISBN 978-2-281-14761-2



9 782281 147612

EDITIONS

LE MONITEUR