

DIAMANTI

DOSSIER DE PRESSE 2024 - 2025

UN OBJET
BÉTON
NON IDENTIFIÉ
À L'ÉPREUVE
DU RÉEL

SOMMAIRE

1.

Les partenaires

2.

La Biennale du Centre
culturel européen (CCE)
à Venise, et l'exposition
"TIME - SPACE –
EXISTENCE"

3.

Masoud Akbarzadeh,
à la croisée des talents

4.

Présentation
du projet Diamanti

5.

Diamanti,
un OBNI Sika à
l'épreuve du réel

6.

L'Impression 3D,
le lieu de
tous les possibles

7.

Assemblage et
précontrainte, vers
la conception finale

8.

Une innovation
majeure pour demain

LES PARTENAIRES

1.



/ 3 /

DOSSIER DE PRESSE DIAMANTI

_Docteur Masoud Akbarzadeh (Université de Pennsylvanie) : design, conception, responsable de la modélisation et de la validation initiale des calculs.

_Sika Technology AG : maîtrise d'œuvre et fourniture de micro-béton pour l'impression 3D, assistance au scellement des différents éléments de la passerelle, expertise technique sur l'impression 3D et ses méthodes de construction (conception, modélisation et slicing).

_CARSEY 3D : concepteur et imprimeur de pièces de grand format en impression 3D béton.

_ÆVIA (filiale travaux spéciaux d'Eiffage Génie Civil) : mise en œuvre de la précontrainte et validation des calculs.

_CERIB (Centre d'Études et de Recherche de l'Industrie du Béton préfabriqué) : évaluations mécaniques, participation aux échanges sur l'application de la précontrainte et réalisation des essais pour l'évaluation des performances du système.

*"Il existe un proverbe qui dit
"Il faut tout un village pour élever
un enfant". Pour faire naître le
projet Diamanti, il aura aussi fallu
de nombreuses personnes,
sur plusieurs continents".*

Karolina Pajak,
Department Leader
3D Printing
du Groupe Sika



2

LA BIENNALE DU CENTRE CULTUREL EUROPÉEN (CCE) À VENISE ET L'EXPOSITION "TIME - SPACE - EXISTENCE"

DOSSIER DE PRESSE DIAMANTI

/ 4 /



*Time Space
Existence
La Biennale du
Centre Culturel
Européen (CCE)
à Venise*

C'est pour l'excellence de son travail académique et l'importance de son apport au monde architectural que le travail du docteur Masoud Akbarzadeh a été remarqué et qu'il a été invité par les organisateurs de la Biennale du Centre Culturel Européen à Venise, l'un des rendez-vous les plus importants du monde en la matière, qui se tiendra du 10 mai au 23 novembre 2025.

Venise est devenue l'un des principaux carrefours mondiaux en termes d'architecture, le lieu de rencontre des plus grands artistes, chercheurs et penseurs de l'objet architectural. En parallèle de la Biennale Architettura 2025, le Centre culturel européen (CCE), organisation culturelle fondée par l'artiste néerlandais Rene Rietmeyer en 2002, organise chaque année, depuis 2011, des expositions biennales d'art contemporain et d'architecture, ainsi que de nombreux symposiums, réunions, ateliers et autres événements éducatifs et rencontres autour de l'art contemporain en général et de l'architecture en particulier. Des artistes de plus de 50 pays sont invités à exposer leurs œuvres et leurs idées, tous animés par un objectif commun : tenter de progresser ensemble et créer une conscience profonde des défis majeurs, notamment climatiques, auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui. Le CCE essaye de rassembler des personnes de cultures différentes dans l'espoir qu'elles apprennent les unes des autres. Les expositions du CCE lors de la Biennale de Venise sont vues chaque année par plus de 600 000 visiteurs du monde entier, l'entrée étant gratuite pour tous.

Elles se tiennent dans trois palais vénitiens et deux jardins publics, soit plus de 4 000 m² d'espace intérieur et 7 000 m² d'espace extérieur. Le Palazzo Mora, le Palazzo Bembo sur le Grand Canal et les jardins Marinaressa sont principalement utilisés pour des expositions. C'est dans ce cadre que le travail de Masoud Akbarzadeh sera offert au public, au cours de l'exposition "TIME-SPACE-EXISTENCE", qui questionne les concepts philosophiques fondamentaux du temps, de l'espace et de l'existence. Elle rassemble un groupe international et éclectique de participants travaillant dans différentes disciplines qui présentent des projets achevés ou en cours, des propositions innovantes et des rêves utopiques d'expressions architecturales qui se concentrent et réfléchissent sur ces sujets en accord avec les discussions contemporaines.



Organisée tous les deux ans, l'exposition "TIME-SPACE-EXISTENCE" vise à stimuler les échanges entre architectes, universités, studios émergents, cabinets internationaux établis, designers, artistes, photographes, promoteurs et sociétés d'ingénierie qui, ensemble, peuvent jouer un rôle crucial dans l'élaboration de l'avenir de nos modes de vie.

C'est dans ce contexte que s'inscrit logiquement le projet Diamanti et l'approche du docteur Masoud Akbarzadeh. Les travaux du professeur sur les structures polyédrales et les perspectives qu'elles ouvrent pour le monde ont été jugés suffisamment novateurs et visionnaires pour être exposés à Venise. L'organisme de sélection opère un tri extrêmement strict des talents actuels : entre 16 et 20 architectes seulement sont honorés tous les deux ans. Pour le professeur et son équipe, tout comme pour ses partenaires industriels, cette exposition médiatique est une immense opportunité de faire connaître ses avancées et ses recherches.

"Nous avons effectué de nombreux allers-retours entre Sika et mon équipe pour résoudre les problèmes qui se présentaient en chemin. Et ils étaient nombreux ! C'était un sacré défi... Finalement, nous sommes parvenus à réaliser une pièce d'art fonctionnelle. Même si cette création est aujourd'hui artistique, l'idée bien sûr est qu'elle débouche sur des applications concrètes dans la vie de tous les jours".

Dr. Masoud Akbarzadeh

MASOUD AKBARZADEH, À LA CROISÉE DES TALENTS

3.

Au commencement était Masoud Akbarzadeh, professeur adjoint d'architecture à la Weitzman School of Design de l'université de Pennsylvanie et directeur du Polyhedral Structures Laboratory (PSL).

Les compétences de ce brillant chercheur, mathématicien et architecte, se déploient à la fois dans les domaines du design, de l'informatique, des mathématiques, de la science des matériaux et de l'ingénierie structurelle et mécanique. Il est animé par l'urgence de développer une approche qui permettrait de minimiser la masse des structures à grande échelle et contribuer à la réduction de l'énergie intrinsèque. Il cherche aussi à concevoir des systèmes capables d'absorber le carbone durant tout leur cycle de vie jusqu'au désassemblage facilité le moment venu.



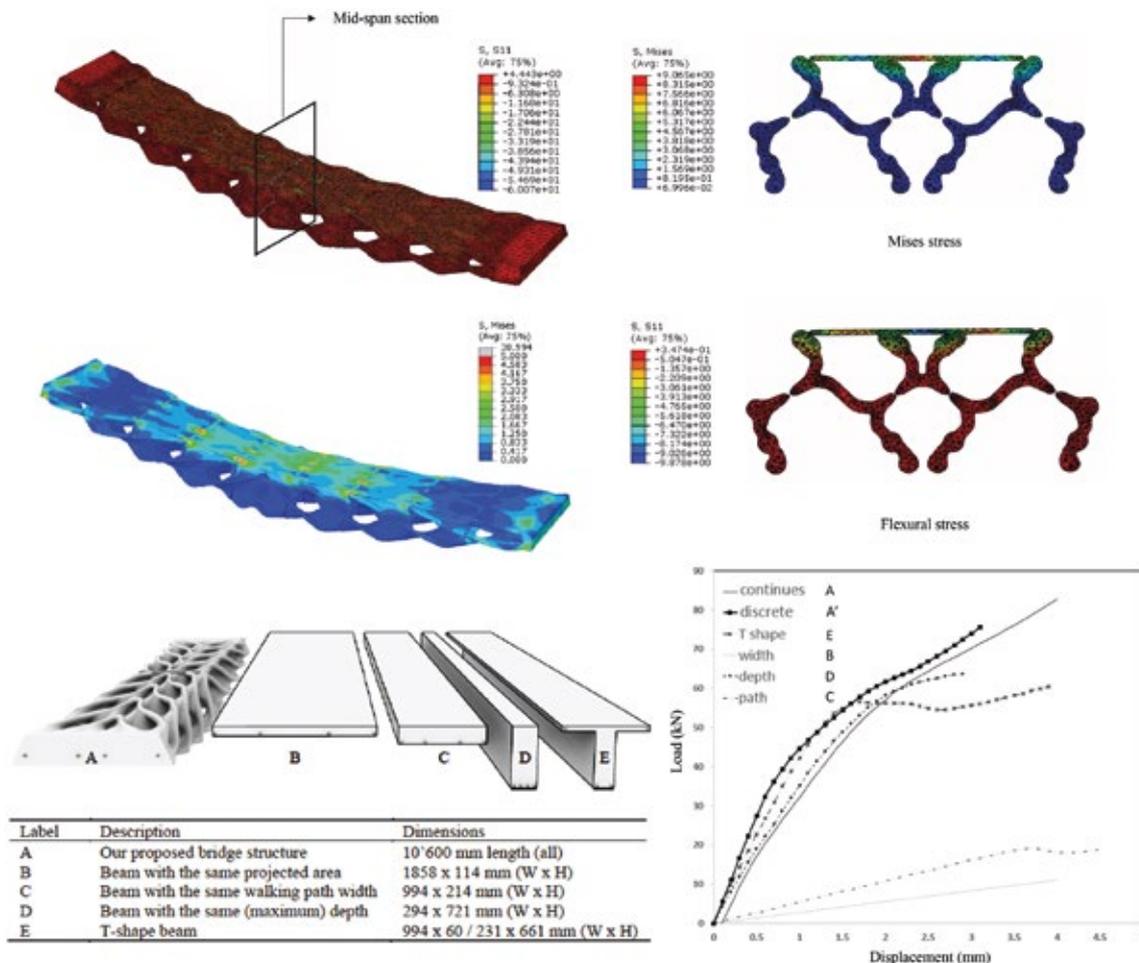
Une éminence grise

Il est titulaire d'un doctorat de l'Institut de technologie en architecture de l'ETH Zurich et de deux diplômes du MIT : un Master of Science in Architecture Studies (Computation) et un MArch, dont la thèse lui a valu le célèbre SOM award. Il est également détenteur d'un diplôme en génie sismique et en dynamique des structures de l'Université des sciences et technologies d'Iran, et d'une licence en génie civil et environnemental. En 2020, il a reçu le National Science Foundation CAREER Award pour ses travaux aux États-Unis et pour avoir étendu les méthodes de la statique graphique tridimensionnelle/polyédrique à l'éducation, à la conception et à l'optimisation des structures à haute performance. Il a également reçu le National Science Foundation Future Manufacturing Grant pour un montant d'environ 4,2 millions de dollars afin de mener à bien ses travaux sur l'avenir de la construction. Le ministère américain de l'énergie finance également son équipe pour promouvoir des méthodes de construction qui réduisent les émissions de carbone.

Une révolution architecturale

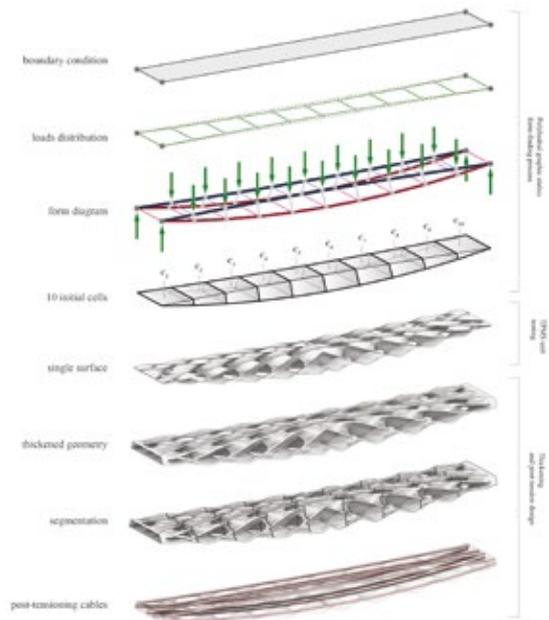
Les travaux de Masoud Akbarzadeh, commencés en 2012, ont révolutionné le domaine de la conception structurelle en ouvrant une nouvelle méthodologie de conception basée sur des méthodes historiques. Son principal sujet de recherche, la statique graphique tridimensionnelle, est une nouvelle méthode géométrique de conception structurelle en trois dimensions qui se concentre sur l'optimisation des structures à haute performance. Pour faire simple – mais comment faire simple en la matière ? – la statique graphique est une méthode d'analyse et de conception structurelle qui représente l'équilibre des forces à l'aide d'outils géométriques.

Modélisation et analyse par éléments finis, et comparaison avec d'autres structures de poutres.
© City College de New York



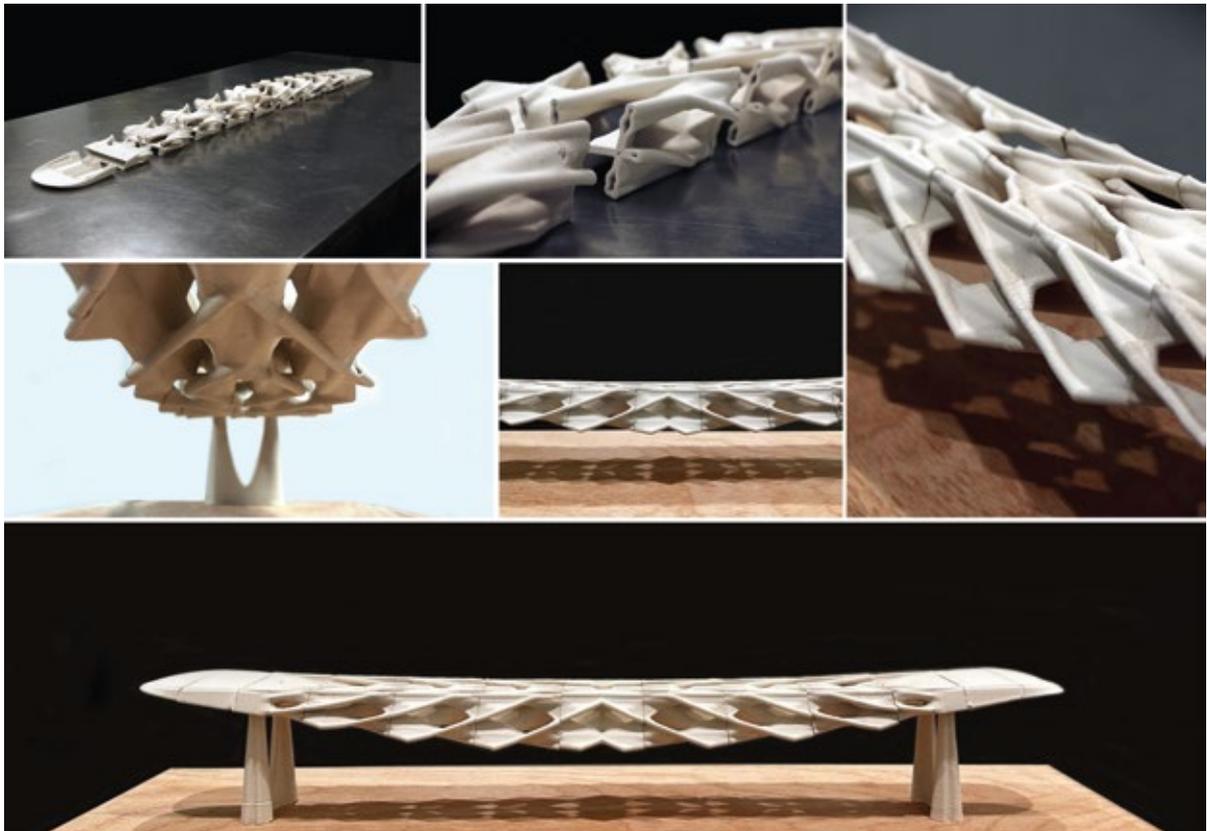
Développée au XIX^e siècle, elle s'appuie sur des diagrammes qui représentent les forces et leurs interactions au sein d'une structure. Ces diagrammes, dits "de forme et de force", sont réciproques, ce qui signifie que leurs changements mutuels s'affectent l'un l'autre. Le diagramme de forme représente la géométrie de la structure, tandis que le diagramme de force montre l'ampleur et la direction des forces internes. Avec l'essor des structures en acier et en béton armé et de l'avènement des méthodes d'algèbre linéaire, cette technique est tombée en disgrâce au milieu du XX^e siècle. Toutefois, son utilisation a connu un regain avec l'intégration d'outils de conception assistée par ordinateur, permettant la manipulation en temps réel des formes et des forces structurelles. Dans la statique graphique 3D, cette méthode est étendue à trois dimensions, ce qui permet d'analyser et de concevoir des structures spatiales plus complexes. Cette approche conduit à l'optimisation des formes structurelles, et fournit aux architectes et aux ingénieurs un outil puissant pour une conception innovante.

Pour que ses inventions passent de la théorie à la pratique et puissent s'incarner grandeur nature il s'est tourné vers Sika. Objectif : trouver des applications concrètes à ses découvertes afin de réussir, à terme, à fabriquer des structures (bâtiments, ponts, maisons...) plus solides, utilisant moins de matériaux (béton, barres d'acier mais aussi verre ou bois) et étant plus respectueuses de l'environnement.



^ Recherche de formes structurelles par la statique graphique polyédrique et la modélisation volumétrique.
© Polyhedral Structures Lab, Université de Pennsylvanie

v Prototypage de Diamanti imprimé 3D en plastique échelle 1/15
© Polyhedral Structures Lab, Université de Pennsylvanie



ENTRETIEN

avec un inventeur
et chercheur modeste
et passionné, engagé
sur le chemin de la
révolution architecturale



Comment avez-vous été sélectionné par le Centre culturel européen pour être exposé à Venise ?

_Le Centre culturel européen a une équipe à Venise qui travaille avec la Biennale pour sélectionner des architectes et des designers. Ils choisissent des architectes dans le monde entier, considérés comme des pionniers dans leur domaine, que ce soit pour leur travail sur les matériaux, la structure, les techniques d'architecture ou la fabrication. Ils nous ont contactés il y a deux ans, car ils voulaient que nous propositions une installation basée sur nos découvertes.

Je suis l'un des rares à avoir étendu les méthodes de conception géométrique des structures à l'aide de la statique graphique tridimensionnelle. L'expertise de mon équipe est d'optimiser les formes géométriques pour transférer les charges dans la structure. Il y a des applications dans les domaines de l'architecture, la science des matériaux, le génie mécanique et le calcul des structures. Il s'agit d'une étude de recherche que j'ai commencée en 2012 et, pour la première fois en 150 ans (elle était auparavant bidimensionnelle), j'ai pu la faire passer en trois dimensions. Cela a ouvert un nouvel horizon pour la conception structurelle et ses applications dans l'architecture.

Participer à ce rassemblement avec cette organisation, le projet Diamanti, est une immense opportunité, car il va pouvoir être vu et expliqué à de nombreuses personnes qui auront la chance de pouvoir le toucher et il bénéficiera d'une vaste couverture médiatique.

Vous dites que votre approche scientifique s'inspire de la Nature elle-même, pourquoi ?

_Prenons la structure d'un os, par exemple. Si l'on effectue une coupe transversale d'un fémur humain, on voit qu'il n'est pas entièrement rempli de matière. Cette dernière est distribuée de manière très particulière. Après des millions d'années d'évolution, le corps et les systèmes naturels ont appris à s'optimiser face à la gravité et aux forces externes. Nous faisons pareil : si nous regardons la section transversale des structures latérales, on observe que le matériau est uniquement à l'endroit où, techniquement parlant, se trouvent les principales lignes de forces. Celles-ci génèrent des champs de contrainte (en fonction de la section de matière) par lesquels une structure naturelle transfère les charges externes aux supports ou au sol. Et il suffit de placer le matériau là où il doit être, au sein de la structure, dans les lignes de forces principales par lesquelles la charge est transférée. On peut ainsi limiter la quantité de matériau. C'est précisément ce que nous faisons. Nous concevons la géométrie de manière que le transfert des forces internes dans les éléments devienne « axial » et minimise le moment de flexion, la torsion et toute autre force qui nécessiterait une augmentation de la section des éléments.

Ici, si l'on considère la section transversale des segments de béton, on constate qu'elle n'est constituée que de deux couches imprimées en 3D, qui sont du béton imprimé mesurant seulement quelques centimètres de largeur. Mais là encore, nous nous appuyons sur une géométrie courbée dans l'espace tridimensionnel, créant des surfaces qui ajoutent de la rigidité géométrique à la structure. **Cette structure semble volumineuse de l'extérieur, mais, en coupe, elle ne comporte que deux couches de béton. Elle est comme un os humain ; elle distribue "simplement" de manière intelligente, relativement peu de matière.**

Je voulais mettre en œuvre mes recherches purement théoriques à des applications concrètes sur divers matériaux et systèmes à grande échelle. L'impression 3D est une technologie de pointe qui permet de créer des structures complexes et performantes. Elle offre la possibilité de produire des pièces très compliquées de manière très efficace, sans contrainte, sans déchet et dans un délai extrêmement court.



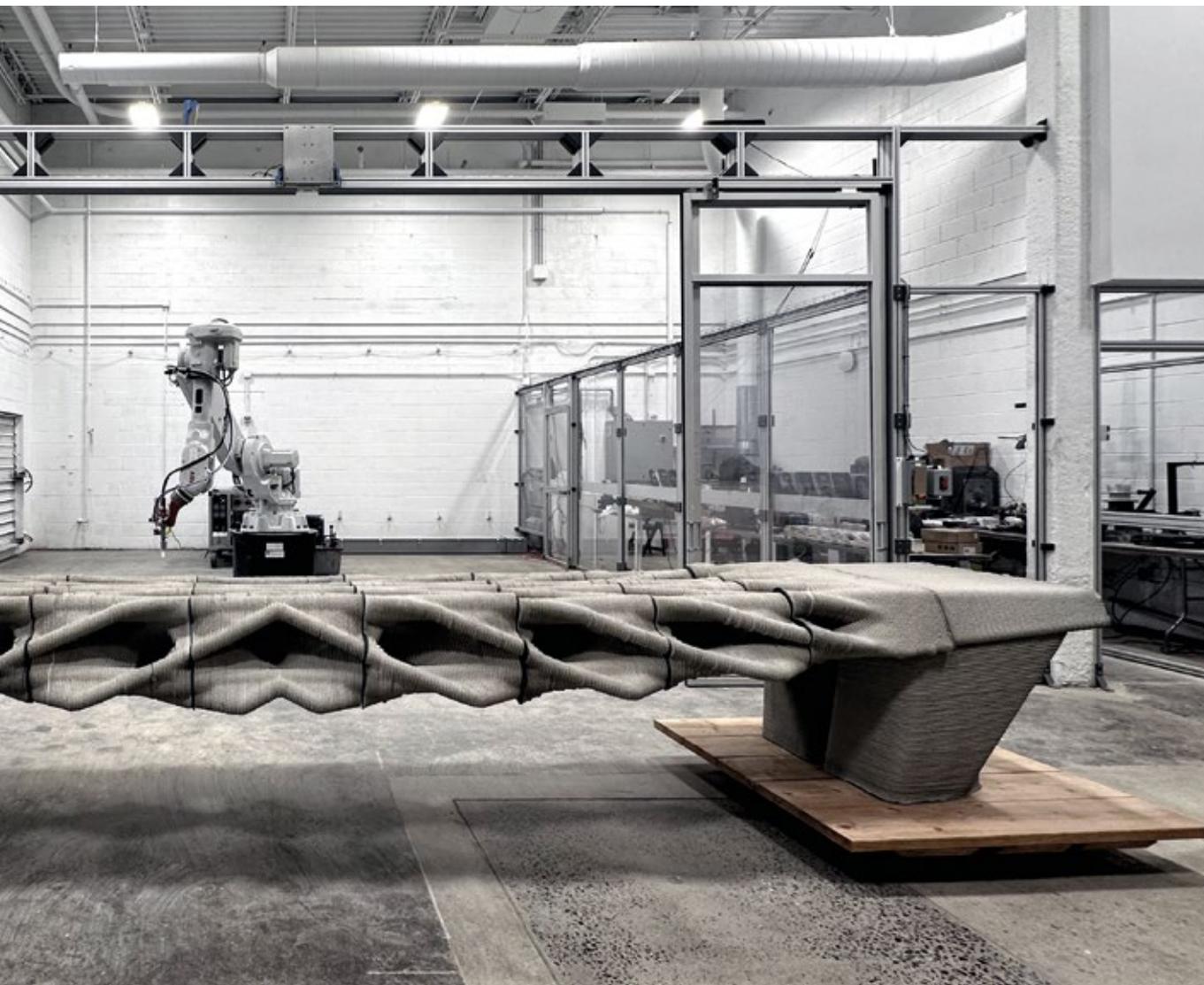
Prototype de Diamanti
imprimé 3D en béton
échelle 1/3. © Polyhedral
Structures Lab, Université
de Pennsylvanie



Pourquoi vous êtes-vous intéressé à l'impression 3D et comment en êtes-vous arrivé à travailler avec Sika ?

« Je voulais mettre en œuvre mes recherches purement théoriques à des applications concrètes sur divers matériaux et systèmes à grande échelle. L'impression 3D est une technologie de pointe qui permet de créer des structures complexes et performantes. Elle offre la possibilité de produire des pièces très compliquées de manière très efficace, sans contrainte, sans déchet et dans un délai extrêmement court. L'avantage de l'impression 3D est que chaque pièce peut être imprimée en quelques dizaines de minutes (en fonction de la taille de l'élément). C'est extraordinaire et cela ouvre des perspectives que l'on ne pouvait qu'imaginer auparavant.

Il y a environ quatre ans, j'ai donc cherché un partenaire aux États-Unis capable d'imprimer du béton en 3D. À l'époque, cette technique était un sujet majeur, et tout le monde s'y intéressait, mais en réalité,



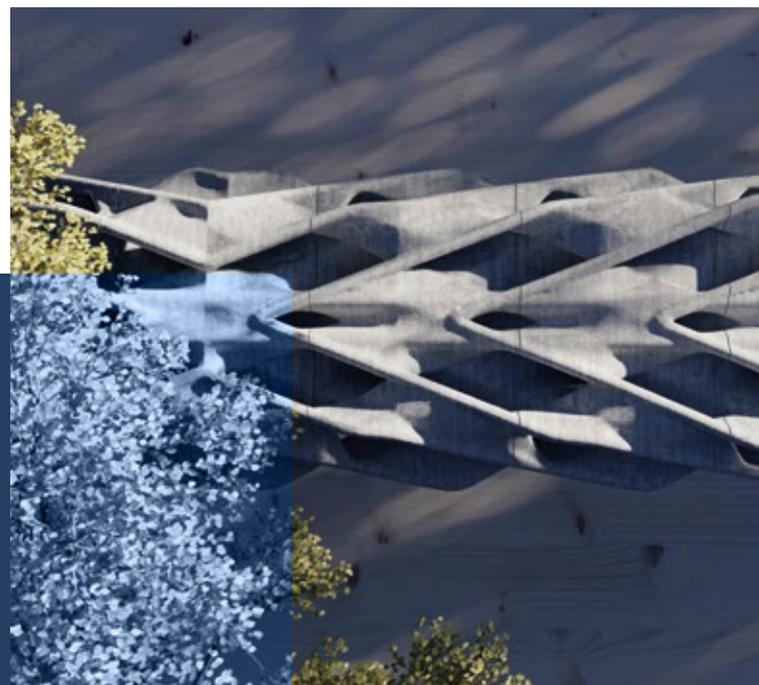
nous n'avions finalement pas une grande connaissance de ces procédés d'impression. Mon équipe et moi, nous travaillions à la conception de structures architecturales plus efficaces utilisant un minimum de masse pour réduire les émissions de carbone et les ressources utilisées pour la construction. C'est pourquoi, nous avons effectué un travail approfondi en expérimentant différents matériaux, notamment le béton, le béton coulé et le béton armé. Nous avons les capacités de couvrir les différents aspects théoriques, depuis les calculs jusqu'à l'analyse, mais nous n'avions pas les installations et le savoir-faire nécessaires pour imprimer 3D en béton. Il nous fallait un véritable partenaire industriel avec qui travailler d'égal à égal, de manière complémentaire, afin de procéder à des tests et repousser les limites de ce qu'il est possible de réaliser avec l'impression 3D béton. Nous avons trouvé un partenaire américain, mais il ne pouvait pas se lancer dans un tel projet, ni prendre de tels risques. Il était en phase de démarrage industriel et commercial, et ne pouvait pas passer du temps avec nous pour

tester l'impression des modèles que nous souhaitions produire. Les pièces étaient complexes et nécessitaient un partenaire industriel avec une équipe de recherche ayant développé un matériau cimentaire imprimable en 3D et un savoir-faire en impression 3D béton, capable de gérer à la fois nos conceptions, leur imprimabilité (slicing et process d'impression), et possédant un client (utilisant sa technologie) en capacité de produire des éléments et mettre en œuvre les travaux/actions nécessaires en post-production (collage, assemblage...). C'est ce qui rend Sika unique, parce qu'elle dispose de fonds de recherche et de capacités pour travailler avec des chercheurs comme nous et parallèlement travaille étroitement avec des partenaires industriels ouverts pour évaluer le passage à l'échelle de nouvelle conception en impression 3D béton. Sika nous est alors apparu comme une évidence.

Quelles ont été les différentes étapes dans l'élaboration du projet Diamanti ?

En 2021, nous avons proposé un design et avons imprimé un échantillon de trois mètres. Le but était juste de tester l'imprimabilité, l'assemblage et la fabrication. Rapidement, nous avons souhaité opter pour une installation à plus grande échelle à la Biennale de Venise. Avec Karolina Pajak, responsable du Digital Lab chez Sika, les choses se sont accélérées car elle a poussé et appuyé le projet. Il nous a fallu environ un an pour traduire tous les détails liés aux particularités et à la complexité de la conception du design que nous voulions montrer. Les défis techniques étaient nombreux et impliquaient des prises de risques parfois délicates à gérer. Il existait de nombreuses zones d'incertitudes, nous ignorions presque tout en fait ! L'assemblage, la fabrication, la préfabrication hors site, son transport jusqu'au site... Nous évoluons dans l'inconnu et apprenions de manière empirique. Voilà pourquoi Karolina Pajak a suggéré que nous construisions un prototype à grande échelle pouvant être testé avec un chargement bien défini, afin que nous comprenions tout le processus d'assemblage et le comportement mécanique structurel pour valider le modèle de calcul théorique.

Le processus n'a pas été simple, il y avait tellement d'inventions à intégrer ! Nous avons dû souvent recommencer, effectuer de nombreux allers-retours entre Sika et mon équipe pour résoudre les problèmes qui se présentaient en chemin. Certaines pièces n'ont pas pu être tout de suite imprimées, car leurs géométries n'étaient pas imprimables. **C'était un sacré défi... Et finalement, nous sommes parvenus à réaliser une pièce d'art fonctionnelle. Je qualifie cette création d'une œuvre architecturale parce que c'est ce qu'elle est, même si l'idée, bien sûr, est qu'elle doit déboucher sur des applications réelles dans la vie de tous les jours.**



^ Image virtuelle vue du dessous de Diamanti.
© Polyhedral Structures
Lab, Université de Pennsylvanie

> Image virtuelle vue du dessus de Diamanti.
© Polyhedral Structures
Lab, Université de Pennsylvanie



Justement, lesquelles ?

Le recyclage et la valorisation figurent également parmi les principales priorités, ou plutôt nouveautés, de ce projet. Le béton est responsable, du moins si l'on parle du ciment Portland, de 6 à 8% des émissions de carbone par an, selon le CNRS Physique⁽¹⁾. Le béton armé, qui est un mélange de ciment Portland, de sable et d'armature en acier, est l'un des principaux contributeurs des émissions mondiales de carbone. La question est donc la suivante : pouvons-nous minimiser l'utilisation du béton afin de pouvoir réduire le carbone incorporé ?

D'autre part, la majorité des armatures en acier actuellement utilisées sont noyées dans le béton, donc si l'on souhaite recycler ces pièces à la fin de leur cycle de vie, il faut utiliser beaucoup d'énergie pour les rendre réutilisables. Donc, avec ce projet, nous voulions d'une part minimiser la quantité de d'acier, afin de réduire les émissions de carbone, et d'autre part, trouver un moyen de renforcer le béton sans noyer les aciers dans le béton, afin de pouvoir les extraire facilement en vue d'un recyclage et d'une réutilisation ultérieurs. Il s'agit là d'une des innovations dans le cadre de ce projet en impression 3D en béton.

Enfin, tout le monde parle du bois comme d'un matériau positif en termes d'émissions de carbone. Mais pouvons-nous utiliser toutes les ressources en bois du monde pour construire de nouveaux bâtiments ? Non, c'est impossible. Nous ne devrions pas couper des arbres pour construire des bâtiments, mais nous devrions chercher de nouvelles recettes de matériaux pour créer des systèmes plus efficaces. Alors paradoxalement, j'ai pris cet élément en béton imprimé 3D et je l'ai soutenu avec du bois. Habituellement, on fait les murs en béton, et les poutres en bois parce qu'elles sont plus légères. Ce que nous essayons de faire passer comme message ici, c'est que le béton peut être suffisamment léger pour que le bois puisse le soutenir. Et pour les constructions futures, les matériaux à teneur en carbone positive comme le bois et le béton devraient être associés pour créer des bâtiments composites à empreinte négative.

Quels sont vos prochains projets ?

Il s'agit de la première structure que nous proposons qui minimise la masse et le renforcement, le premier prototype. Il reste beaucoup à explorer. J'espère pouvoir poursuivre ce projet et aller plus loin avec Sika et réfléchir à ses applications concrètes dans la construction de bâtiments. Cette installation est provisoire, mais le but est de construire des structures durables, comme un pont, un immeuble de plusieurs étages, ou même une petite maison. Et sinon, je ne travaille pas qu'avec le béton, mais aussi avec le verre. Je vais inaugurer une autre installation avec une exposition au Recording Museum of Glass en novembre, où nous présenterons un pont de dix mètres de long fabriqué avec seulement 1,6 centimètre de verre.

Pour en savoir plus sur

Dr. Masoud Akbarzadeh

<https://psl.design.upenn.edu/>

(1): Vers de nouveaux ciments bas-carbone | CNRS Physique



Le recyclage et la valorisation figurent également parmi les principales priorités, ou plutôt nouveautés, de ce projet.

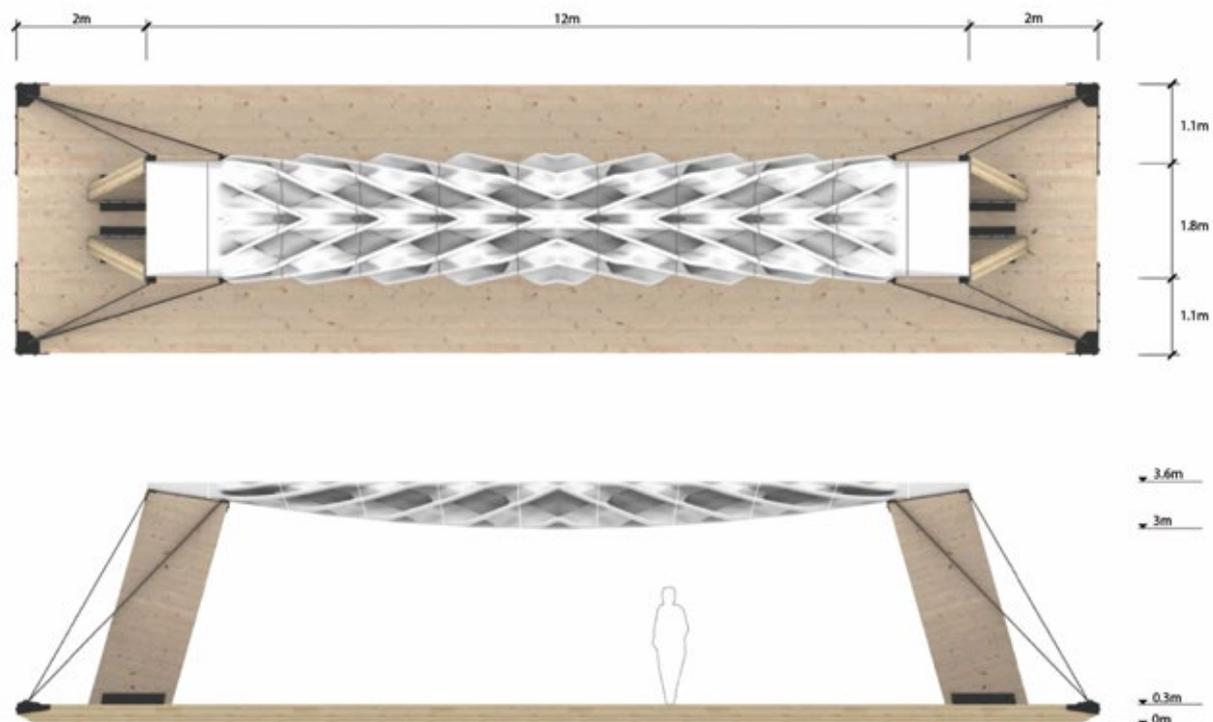
4

PRÉSENTATION DU PROJET DIAMANTI

Le projet Diamanti est l'exemple d'une collaboration fructueuse entre l'université et l'industrie. Il sera présenté à la biennale 2025 du Centre culturel européen, dans la cadre de l'exposition "TIME-SPACE-EXISTENCE", à Venise, en Italie.

Elle est d'abord née dans la tête de Masoud Akbarzadeh, un designer multi-disciplinaire dont les travaux intègrent les principes de l'architecture, de l'ingénierie structurelle, de l'informatique et des mathématiques appliquées. Le projet présenté à la Biennale est donc une structure polyédrique imprimée en 3D béton, renforcée par post-contrainte, visant à minimiser la quantité de matière utilisée (matériaux et armatures). L'architecte a déjà participé à plusieurs projets qui intègrent les principes polyédriques. Tous ont démontré comment la géométrie complexe peut être utilisée pour créer des bâtiments esthétiquement remarquables et structurellement solides.

Croquis Dimanti vue du dessus et de face
© Polyhedral Structures
Lab, Université de Pennsylvanie



Une structure funiculaire, kezaco ?

Les formes structurelles efficaces supportent les charges appliquées sous la forme de forces de tension et/ou de compression pures. Dans ces systèmes, chaque élément de la structure supporte une force interne de manière axiale, c'est-à-dire que l'élément est aligné sur la direction de la force interne et que sa section transversale est normale à la direction de la force. Le fait de supporter la force en traction/compression pure limite le type de contrainte à la seule contrainte axiale et minimise les autres formes de contrainte, telles que la flexion, le cisaillement et la torsion. Il a été prouvé que les structures peuvent résister à des forces plus importantes si la contrainte axiale est la forme dominante de contrainte dans leurs membres. En outre, moins de matériaux sont nécessaires pour supporter les forces axiales ; par conséquent, moins de matériaux sont utilisés pour construire ces structures, ce qui les rend très efficaces.

Ces systèmes structurels sont souvent appelés structures funiculaires. La géométrie de la structure funiculaire et de ses membres correspond précisément à la direction des lignes de force interne. Les structures de traction sont d'excellents exemples du système funiculaire, car la géométrie de la structure représente fidèlement la direction des lignes de forces à l'intérieur du système. L'utilisation des formes funiculaires dans la conception des structures a déjà été utilisée dans le passé, notamment par Gaudí, dans la conception de la Sagrada Família à Barcelone.

“Paradoxalement, j’ai pris cette poutre en béton imprimé 3D et je l’ai soutenue avec du bois. Le béton peut être suffisamment léger pour que le bois puisse le soutenir. Et pour les constructions futures, tous les matériaux positifs, et essentiellement les matériaux qui réduisent le carbone au moment de la conception, comme le béton, devraient travailler en tandem”.

Dr Masoud Akbarzadeh



Et une structure polyédrique, qu'est-ce que c'est ?

Une structure polyédrique est une entité en trois dimensions formées par des faces polygonales, des arêtes et des sommets. Ces agencements sont omniprésents dans la nature et l'ingénierie en raison de leurs propriétés géométriques et de leur efficacité structurelle. Esthétiquement, elles sont également intéressantes, car elles débouchent sur des formes intrigantes et flatteuses. De même, les dômes géodésiques, popularisés par Buckminster Fuller dans les années 1950 et 1960, sont basés sur des principes polyédriques permettant une répartition égale des charges, une grande stabilité structurelle et offrent une grande résistance structurelle avec une utilisation minimale de matériaux.

De nombreuses formes polyédriques sont inspirées par la nature : on les trouve dans des structures comme les cristaux, les molécules et certains organismes vivants. L'intégration de ces formes dans l'architecture peut créer des bâtiments qui s'harmonisent avec leur environnement naturel. On parle alors d'une démarche "bio-inspirée". Dans le projet de Masoud Akbarzadeh, les structures polyédriques sont funiculaires. En effet, elles combinent la géométrie polyédrique avec une orientation efficiente des lignes de force en utilisant la statique graphique polyédrique qu'il a développée en tant que nouvelle méthodologie de conception depuis 2012. Ces structures sont creuses, et, combinées à l'impression 3D, elles offrent l'opportunité de réaliser une nette économie de matière, de mieux répartir les forces et d'être plus légères. Le béton imprimé 3D offre une liberté, une faisabilité et une facilité de réalisation inédite et presque illimitée. Esthétiquement, les structures polyédriques funiculaires en béton imprimé 3D ouvrent la voie à des formes complexes, inventives et totalement nouvelles, et bio-inspirées comme dans le cas du projet Diamanti. Avec du béton traditionnel, leur conception serait infaisable. Mais avec l'impression 3D, il est envisageable de les fabriquer, et de les assembler selon ses besoins.



Image de
Diamanti.
© Polyhedral
Structures Lab,
Université de
Pennsylvanie

Le prototype d'une passerelle en béton imprimé 3D

Le projet Diamanti est la démonstration scientifique et artistique de la viabilité de l'approche polyédrique et de l'impression 3D béton, de son utilité et de ses usages futurs potentiels dans des applications concrètes, notamment dans les domaines du génie civil et bâtiment. Pour atteindre cela, de nombreuses recherches de forme et de fabrication ont été menées en partenariat entre le laboratoire de recherche du Docteur Masoud Akbarzadeh, Sika Corporate et Carsey 3D. Le but était au-delà du fait de présenter une œuvre majeure à la Biennale d'architecture de Venise, de parvenir à finaliser ce qui aboutira à terme à une passerelle en béton imprimé 3D, minimisant les émissions de carbone grâce à la réduction des matériaux et des barres d'acier. En effet, grâce à la liberté de conception permise par l'impression 3D béton exécutée sur le site industriel de Carsey 3D, et à l'utilisation de la post-tension, la conception finale présente un renforcement minimal tout en atteignant les performances structurelles souhaitées.



La précontrainte à l'épreuve de l'art

La réalisation du projet Diamanti est donc rendue possible par la combinaison de deux techniques majeures : l'impression 3D béton, qui offre une liberté créative et une marge d'exécution incomparable, et l'application de la précontrainte (ici par post-tension). Grâce à la précontrainte, il est possible de réaliser de grandes portées sans support supplémentaire, ce qui permet aussi de minimiser la quantité de matériaux utilisés et d'obtenir une empreinte carbone la faible que possible.

La post-tension est utilisée depuis longtemps, et sert entre autres à construire des ponts en assemblant des voussoirs préfabriqués. Mais ici, le défi était d'y faire appel pour des formes géométriques "originales", car bio-inspirées et majoritairement creuses, et avec ce matériau de béton imprimable en 3D développé par Sika. Ævia (filiale d'Eiffage) a dû adapter sa technique pour assembler des sections imprimées 3D béton avec les câbles et ses ancrages de précontrainte pour prouver la faisabilité. Ainsi, toutes les parties prenantes du projet Diamanti ont pu vérifier qu'il était possible de réaliser des structures plus fines et plus grandes sans appui intermédiaire sur la portée de l'ouvrage.

Assemblage
des voussoirs
de Diamanti.

L'alliance du bois et du béton

Le projet Diamanti, aujourd'hui poutre imprimée 3D béton précontrainte, pèse environ 7,8 tonnes – il est envisagé de la poser sur une structure de soutien en bois. L'objectif est de montrer les différentes applications de ce système. Il peut être utilisé comme pont piétonnier et comme élément de portée pour les systèmes de plancher. Mais il envoie également un message important à ceux qui s'intéressent aux structures composites en bois et en béton, où le béton est imprimé en tant que mur et élément vertical, et où le bois couvre les distances en raison de sa légèreté. Nous montrons dans ce projet que le béton peut être une structure efficace pour franchir les distances et qu'il est suffisamment léger pour être soutenu par une structure en bois. L'une des obsessions de Masoud Akbarzadeh est de minimiser l'impact de l'homme sur la nature (voir l'interview page 9). Ce projet montre qu'il est possible de combiner un matériau neutre en carbone (le bois) avec le béton comme élément de portée pour une future construction.

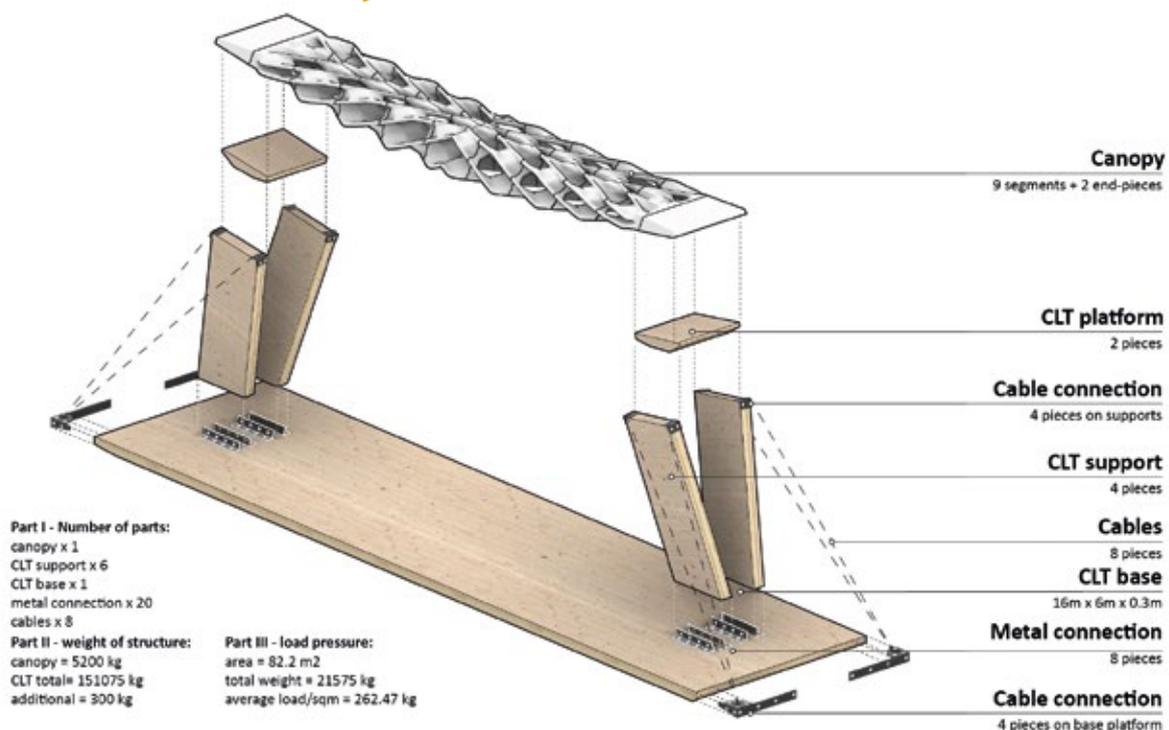
Fiche d'informations
de Diamanti.
© Polyhedral Structures
Lab, Université
de Pennsylvanie

Le projet Diamanti en chiffres

- **Longueur** : 9 mètres
- **Largeur** : entre 1,5 m (sur le dessus) et 1,80 m (en-dessous)
- **Poids** : 7,8 tonnes
- **9 éléments** (voussoirs) entre 500 et 900 kg chacun
- Supporte un **chargement réparti de 500 kg au mètre carré**
- **Largeur des cordons imprimés 3D béton** : 4 centimètres
- **Quantité de béton qui diminue à estimation jusqu'à 60% par rapport au Béton Armé (BA) traditionnel** pour un plancher non précontraint, estimation jusqu'à 14% par rapport au BA traditionnel pour un plancher précontraint, estimation jusqu'à 4% pour une poutre en T non précontrainte.
- **Quantité d'acier qui diminue à estimation jusqu'à 94% pour un système de plancher BA traditionnel non précontraint**, estimation jusqu'à 81% pour un système de plancher BA traditionnel avec précontrainte, estimation jusqu'à 81% pour une poutre en T non précontrainte.

/ 17 /

DOSSIER DE PRESSE DIAMANTI



5.

DIAMANTI, UN OBNI SIKA À L'ÉPREUVE DU RÉEL

Sika et le projet Diamanti à l'épreuve du réel

Ce serait bien mal regarder le projet Diamanti que de n'y voir qu'un assemblage de mortier, de câbles d'acier, de bois, une construction, certes arachnéenne, mais uniquement sortie du bras robotisé d'une machine d'impression 3D. Le projet Diamanti n'est pas né sur le site industriel de Carsey 3D, à Coubert (77). C'est là qu'il a vu le jour, certes, mais sa conception a commencé bien avant. Dans la tête du brillant Docteur Masoud Akbarzadeh, mais aussi de la volonté, de la curiosité, de l'engagement d'une poignée de femmes et d'hommes passionnés par leur travail, amoureux de l'innovation et soucieux de faire toujours mieux en poussant leurs compétences au-delà des frontières connues et de leurs pratiques professionnelles quotidiennes.

Repousser les limites

"Ce n'est pas tous les jours que l'on a l'opportunité, dans notre travail, de préparer un projet qui sera exposé à la biennale de Venise ! sourit Karolina Pajak, Head of Digital Lab chez Sika Technology. Ce projet s'est bâti autour de partenaires formidables, c'est vraiment un travail d'équipe. Tous ensemble, nous sommes parvenus à repousser les limites de ce que peut faire l'impression 3D béton. Il existe un dicton qui dit 'Il faut tout un village pour élever un enfant'. Pour finaliser le projet Diamanti, il aura aussi fallu de nombreuses personnes, sur plusieurs continents". Le premier gros volet vers la conception du projet Diamanti a concerné Sika et le Docteur Masoud Akbarzadeh. Ce dernier s'est tourné vers Sika car, aux États-Unis, aucune entreprise n'avait alors les compétences pour l'aider. L'entreprise Suisse possède plusieurs centres de R&D à travers le monde, chacun spécialisé dans différents aspects de la recherche et de l'innovation. Tous collaborent étroitement avec les universités, les instituts de recherche, et les clients pour développer des solutions de pointe. Les équipes bénéficiaient donc déjà d'une solide expertise, et d'un goût prononcé pour l'innovation. Encore fallait-il le faire à la manière de Sika : avec sérieux, et en privilégiant, avant tout, la sécurité.

Les équipes européenne du projet Diamanti au CERIB.



L'innovation en mouvement

Les premiers échanges se font entre l'université de Pennsylvanie et le laboratoire en charge de l'impression 3D de Sika Technology, à Zurich. Une étape longue et semée d'embûches : tout le monde avance en terrain inconnu. Chaque semaine, les ingénieurs de Sika se réunissent avec les équipes de Masoud Akbarzadeh, afin d'ajuster les calculs, modifier les paramètres, l'épaisseur, les couches ou la taille pour tester les réactions du modèle. *“Grâce à la conception paramétrique de l'équipe de Pennsylvanie, nous n'avions pas à repenser toute la structure à partir de zéro, c'était relativement facile, raconte Karolina Pajak. Cela nous a montré à quel point l'impression 3D peut être polyvalente et flexible. Nous nous en doutions bien, mais nous en avons alors eu une preuve supplémentaire. Avec une technologie standard, nous n'aurions tout simplement pas pu le faire. D'autant qu'à chaque changement, il aurait fallu reprendre tout le projet de zéro. Là, il suffisait juste de répéter la conception”.*

Les dialogues et allers-retours avec les équipes du Polyhedral Structures Laboratory (PSL) aux États-Unis ont été longs et marqués par de nombreux tests. Il fallait comprendre le matériau et établir comment il

était susceptible de réagir au moment de l'impression 3D. Pour résumer, l'impression en béton 3D utilise un processus automatisé et numérique pour superposer des couches de béton selon un modèle précis. Ce modèle numérique est créé avec un logiciel de conception assistée par ordinateur, et ensuite converti en un format compatible avec l'imprimante 3D. Il est ensuite divisé en couches horizontales, qui serviront de guide pour l'imprimante.

Après avoir optimisé la conception afin de limiter les porte-à-faux à une plage imprimable, le slicing lui-même a été une étape importante pour garantir la qualité des éléments imprimés. Le principal défi lors de l'impression d'une telle structure est que, contrairement aux objets à coque simple, elle comporte des trous et des couches déconnectées. *“Avec l'impression 3D de béton, en particulier le système à trois composants, l'arrêt d'impression pour passer d'un groupe de couches à un autre est limité à quelques secondes. Pour éviter de boucher la buse ou de faire tomber de la matière sur l'élément, le parcours du robot a été soigneusement optimisé et a permis d'imprimer les éléments du début à la fin sans arrêter les impressions ni réduire la qualité d'impression”,* précise Mylène Bernard.

“Cette approche polyédrique permet une importante économie de matière, l'enjeu est donc important. Nous avons déjà utilisé cette technologie là sur du plastique, mais sur du béton, jamais. Le projet Diamanti nous sert d'élément de preuve pour la suite, et pour pouvoir imaginer l'appliquer à de véritables passerelles piétonnes”.

Fabrice Decroix,
Directeur Innovation Sika France



Une structure innovante

Cette technique est brevetée depuis 1996 mais a vraiment pris de l'ampleur au milieu des années 2010. Aujourd'hui, l'impression 3D en béton est utilisée pour une variété d'applications, des maisons résidentielles et des bâtiments commerciaux aux projets d'infrastructure tels que les passerelles piétonnes. *"Mais ce qui existe actuellement n'a rien à voir avec ce que nous voulions faire, explique Alberto Arena, PDG de Carsey 3D. Jusqu'à présent, les industriels qui ont fait des passerelles 3D ont copié l'ancien modèle : ils utilisent l'impression 3D comme coffrage perdu et sécurisent la partie structurelle avec du BFUP (bétons fibrés à ultra-hautes performances) coulé à l'intérieur de la coque imprimée, ils enlèvent juste la partie coffrage. Nous, nous avons fait complètement autre chose, en innovant également dans la structure".*

En effet la complexité du projet Diamanti réside dans sa forme, totalement inédite car bio-inspirée, et donc bien plus "creuse" que la normale. D'où ces phases de calcul unique et sans précédent. Si la géométrie statique graphique polyédrique développée par le laboratoire du Docteur Masoud Akbarzadeh fournissait la liberté de conception nécessaire pour obtenir une structure capable de faire face aux forces de compression et de tension développées, encore fallait-il procéder aux calculs et vérifications pour établir comment le matériau pourrait réagir face aux contraintes appliquées.





Voussoir imprimé 3D béton.
© Carsey 3D



L'ingénierie de Sika

"Le matériau imprimé 3D a deux anisotropies, la première classique pour le béton, est la différence de résistance entre la compression et la traction et la seconde, nouvelle, liée à l'impression 3D, est la différence de résistance selon que l'effort est appliqué parallèlement ou perpendiculairement au tracé des couches d'impression", explique Fabrice Decroix (Directeur Innovation Sika France). "Il est particulièrement performant en compression. Voilà pourquoi le recours à la précontrainte élimine la plupart des problèmes, puisque l'on prend les deux anisotropies dans le bon sens". Des deux côtés de l'Atlantique, les ingénieurs de Sika et du Polyhedral Structures Laboratory (PSL) se sont livrés à des calculs, des simulations, des essais. Une longue phase de réflexion et d'essais-erreurs pour apprendre à avancer en terre inconnue.

Le choix de la sécurité avec un prototype grandeur nature

"Traduire tous les détails liés aux subtilités de la conception que nous avons l'intention de montrer à Venise a pris un an de travail avec Karolina et son équipe, se souvient Masoud Akbarzadeh. Ce projet était vraiment complètement nouveau. Il y avait tellement d'inventions que nous voulions intégrer ! Nous avançons sans savoir et apprenons de manière empirique. Nous ignorions comment la structure allait réagir !". Rigidité, résistances mécaniques, déformations, assemblage, préfabrication hors site, transport, processus d'assemblage et comportement structurel... Personne n'avait de visibilité sur le comportement réel. Aussi Karolina Pajak a-t-elle pris la décision audacieuse de construire un prototype à échelle 1 pouvant être testé en charge, afin de réellement pouvoir évaluer son comportement sous chargement et passer de la théorie "à la vraie vie". Une démarche particulièrement rare dans le domaine industriel, mais qui s'inscrit dans l'ADN de Sika, pour qui la sécurité passe avant tout.

D'autant que derrière la fabrication du prototype, il y a aussi des enjeux économiques. "Cette approche polyédrique permet une importante économie de matière, rappelle Fabrice Decroix, l'enjeu est donc important. Nous avons déjà utilisé cette technologie-là sur du plastique, mais sur du béton, jamais. Nous devons vérifier que, d'un point de vue sécuritaire, le projet Diamanti répondrait aux exigences que nous nous sommes fixées chez Sika. Cela nous sert d'élément de preuve pour la suite, et pour pouvoir imaginer l'appliquer à de véritables passerelles piétonnes".



L'IMPRESSION 3D, LE LIEU DE TOUS LES POSSIBLES

L'approche 3DCP (Three-Dimensional Concrete Printing) désigne une méthode de construction qui utilise la technologie de l'impression 3D pour créer des structures en béton.

Cette technique implique l'utilisation d'un système robotique automatisé pour extruder le béton couche par couche, en suivant un modèle numérique.

Les principaux avantages du 3DCP sont l'augmentation de l'efficacité de la construction, la réduction des coûts de main-d'œuvre, la minimisation du gaspillage de matériaux et la capacité de produire des conceptions complexes difficiles à réaliser avec les méthodes traditionnelles, voire tout simplement impossible en ce qui concerne le projet de la Biennale d'architecture de Masoud Akbarzadeh.

Le savoir-faire de Sika

Sika travaille avec l'impression 3D béton depuis un peu près de 10 ans. Si les premiers essais ont démarré en France, dans le laboratoire de Gournay-en-Bray et Zurich, l'entreprise possède aujourd'hui cinq centres technologiques partout dans le monde. Il existe plusieurs technologies d'impression 3D du béton sur le marché, mais la complexité du design du projet Diamanti et de la forme géométrique à imprimer a conduit Sika à choisir un mortier d'impression multicomposant : SikaCrete® 7100 3D. L'objectif était de pouvoir imprimer les éléments des segments tout en garantissant le niveau de qualité et l'esthétique de la pièce. Le mélange SikaCrete® 7100 3D comprend trois composants : le polymix SC-202 3D, l'activateur AC-401 3D et la poudre DC-103 FB 3D.

La fabrication en tant que telle a suivi le processus suivant : la poudre est mélangée au polymix et à l'eau, puis elle a été pompée vers une tête d'impression de mélange à taux de cisaillement élevé, montée sur un portique. Au niveau de la tête d'impression, le mélange a été accéléré et extrudé par une buse. L'activateur permet un temps de prise rapide du béton ce qui permet d'obtenir des porte-à-faux importants. Par rapport aux systèmes monocomposant (non activé en tête d'impression), où la hauteur de l'impression est liée à un temps de prise plus lent des couches - qui doivent résister à la charge des couches suivantes - un système accéléré permet d'obtenir des impressions plus hautes en une seule session avec des parois globalement plus minces.

Diamanti avant
départ pour test
au CERIB.
©Carsey 3D

Prototype de
Diamanti imprimé
3D en plastique à
l'échelle 1:15.



Le choix d'un prototype à échelle 1 : 1

Cette phase a elle aussi été accompagnée de nombreux calculs et tests. Une des problématiques de l'impression 3D béton, est de trouver le système de renforcement structurel adéquat, puisque, si on sait positionner et calculer les armatures dans le béton armé, on entre encore en terre inconnue avec le béton imprimé. Pour garantir la réussite de l'impression et de l'assemblage, des modèles pour le projet Diamanti à quatre échelles différentes avaient été produits, avant l'étape de l'impression 3D à taille réelle. Il s'agissait de mieux comprendre le processus d'impression, la faisabilité de l'assemblage et prévoir la manière dont le matériau résisterait à la compression et à la flexion. Voilà pourquoi, au cours de l'évaluation du projet, plusieurs adaptations des normes existantes ont été effectuées, afin de mesurer au mieux l'influence des couches imprimées sur les propriétés du matériau.

Grâce à l'impression de prototypes à grande échelle, des ajustements supplémentaires ont été apportés à la technique d'impression et à la trajectoire de l'outil, ainsi que des modifications mineures à la conception, afin de garantir une fabrication réussie.

Une étonnante rapidité d'exécution

C'est sur le site industriel de Sotubema, marque de solutions d'aménagements urbains et routiers du groupe Carsey, concepteur et fabricant de pièces de grand format en impression 3D béton, à Coubert (77) que la fabrication a eu lieu, sur la première imprimante à portique 3D à vocation industrielle en France. C'est cette unité d'impression de 3,50 m sur 3,50 m, installée sur une zone dotée de toutes les facilités (manutention, transport, zone de stockage, zone de préparation...), qui a construit, en un temps record qui ne cesse de fasciner, les neuf éléments du projet Diamanti, entre 500 et 900 kilos chacun. Pour cette étape "émouvante", les différents partenaires du projet s'étaient rassemblés sur le site de Carsey 3D. Dont Alain Simon, Directeur technique chez ÆVIA, une filiale d'Eiffage, chargé de l'application de la précontrainte.

"Ce qui m'a probablement le plus étonné, c'est qu'en moins de deux heures, on avait imprimé un voussoir. Il faut savoir qu'en général, une tranche de structure, c'est un cycle qui s'exprime en jours ou en semaines : il faut un coffrage, un ferrailage, un coffrage autour du ferrailage, mettre les inserts à l'intérieur, puis couler le béton, attendre, puis décoffrer. Et là, sous mes yeux, en une heure et demie, c'était fait... Ce n'est donc pas tant la forme qui m'a impressionné que la manière de l'obtenir".



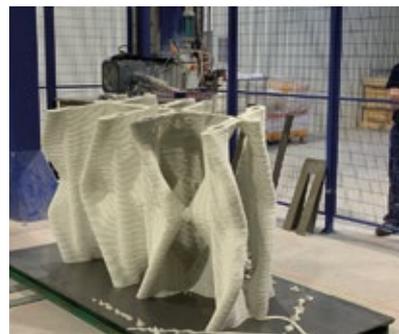
“Nous n’avons jamais fait de pièces si complexes, ni si originales. Normalement, nous fabriquons de grosses pièces en béton avec une forme parallélépipédiques et avec beaucoup d’acier à l’intérieur. Là, nous avons considérablement réduit la quantité d’acier et de béton pour obtenir un design si particulier, si esthétique”.

Alberto Arena,
PDG de Carsey 3D

Le partage des expériences

Pour Alberto Arena aussi, PDG de Carsey 3D, l’expérience était marquante : *“Clairement, c’est un sujet tout nouveau. Nous n’avons jamais fait de pièces si complexes, ni si originales. Normalement, nous fabriquons de grosses pièces en béton avec une forme parallélépipédiques et avec beaucoup d’acier à l’intérieur. Là, nous avons considérablement réduit la quantité d’acier et de béton pour obtenir un design si particulier, si esthétique. Ce n’est pas si fréquent que l’art rencontre la construction. Tout seul, nous ne nous serions jamais lancés, mais avec des partenaires comme Sika, Ævia, et le CERIB, nous avons eu envie d’essayer. Partager des savoir-faire et apprendre des choses, c’est un immense motif de satisfaction pour toutes les équipes”.*

Afin de garantir la meilleure qualité d’impression et d’esthétique possible, la zone d’impression a même été climatisée. Si l’on veut conserver le niveau de précision et de qualité qui est attendu avec ce type de machine, il faut en effet pouvoir travailler en ambiance contrôlée, avec une température garantie établie entre 17 et 25 degrés, quelle que soit la saison. Cela représente un investissement non négligeable en termes d’isolation thermique, mais assure une constance de résultat et un niveau d’impression exceptionnel.



7.

ASSEMBLAGE ET PRÉCONTRAINTE, VERS LA CONCEPTION FINALE

Commence alors une autre partie délicate, l'assemblage des neuf segments et l'application de la précontrainte.

Cette opération a également eu lieu sur le site industriel de Carsey 3D, à Coubert (77). À l'intérieur des pièces en impression 3D, les ingénieurs avaient positionné des tubes dans lesquels faire passer les câbles de précontraintes.

/ 25 /

DOSSIER DE PRESSE DIAMANTI

Au préalable, afin d'obtenir la courbure correcte et de contrecarrer les forces appliquées à la structure, les gaines ont été noyées dans un mortier de scellement fin, le SikaGrout®-217. L'alignement étant la clé de la répartition uniforme de la précontrainte lors de l'étape ultérieure de la précontrainte, de nouvelles méthodes ont été utilisées pour placer les gaines, à l'aide de technologies innovantes telles qu'une découpeuse laser et des objets de placement imprimés en 3D à partir de polymères.

*Diamanti
avant départ pour
test au CERIB.
© Carsey 3D*



La précontrainte est une méthode qui consiste à appliquer des charges de compression très élevées aux segments d'extrémité afin de comprimer la structure. C'est pourquoi les extrémités ont également été remplies d'un mortier de scellement haute performance, le SikaGrout®-238 chargé, et renforcées par une armature en acier conventionnelle afin d'éviter que cette partie de la structure ne se brise.

Cependant, aucun coulis n'a été utilisé autour des aciers de précontrainte. Il s'agit d'un cas de précontrainte par post-tension sans adhérence. En termes structurels, cela signifie que les câbles de précontrainte agissent comme des forces externes appliquées à la structure. En revanche, avec l'injection, la précontrainte aurait agi de manière monolithique avec le béton, créant une interaction plus intégrée entre les câbles et le béton. L'effet obtenu reste similaire en termes de réduction des contraintes de traction dans le béton, mais les méthodes de calcul sont différentes.

Ensuite, les pièces, qui avaient été imprimées verticalement, ont dû être retournées de 90 degrés et positionnées sur une mousse préformée, spécialement conçue pour recevoir le design si peu classique du projet Diamanti. L'ensemble a été posé sur des chariots roulants, afin de pouvoir être déplacés et surtout, dans le but de pouvoir gérer la hauteur des segments et poursuivre les opérations.

L'assemblage avec du Sikadur®-30

Les segments ont été méticuleusement assemblés et collés à l'aide de Sikadur®-30, un adhésif structural. "Le Sikadur®-30 était particulièrement bien adapté à cette application, car il a un long temps ouvert, ce qui lui confère une flexibilité suffisante pour l'application, ainsi qu'une excellente adhérence au béton", explique Léon Troussel, ingénieur chez Sika.

Il a fallu développer de nouvelles procédures et techniques en raison de l'approche inhabituelle de l'assemblage. Les segments ont été assemblés et alignés à l'aide de chariots de portée ajustable. Une attention particulière a été apportée pour que l'adhésif reste sur la section transversale et ne pénètre pas dans les conduits, afin d'éviter les points durs involontaires dans la structure avec les fils de précontrainte. Tout a été mis en œuvre pour maintenir les gaines propres tout au long du processus. Au fur et à mesure de l'assemblage, les câbles de précontrainte ont été insérés dans les gaines.

Les segments ont été collés les uns aux autres de manière séquentielle. Après l'application de la colle, une pression a été appliquée à chaque joint pour assurer l'absence d'air emprisonné pendant le processus de collage.

**Test du premier
essai de chargement
au CERIB.**



Sept jours après l'opération de collage, Ævia est entré en jeu. Cette filiale d'Eiffage, créée mi-2019, s'est spécialisée dans la conservation et à l'amélioration du patrimoine pour tous types d'ouvrages et a développé un indéniable savoir-faire dans le renforcement de structures. *"La grosse innovation de ce projet, c'était qu'il n'y avait pas de béton armé, se souvient Alain Simon, Directeur technique chez ÆVIA. C'est le béton imprimé qui devait soutenir tous les efforts de la précontrainte. Et au moment de le faire, même si nous étions confiants, nous ne pouvions pas savoir si cela allait totalement fonctionner"*.

Cette expérience souligne l'importance pour les concepteurs de nouvelles méthodes de les mettre en pratique, afin de vérifier si leurs hypothèses sont conceptuelles ou réellement réalisables.

La post-contrainte, une technique ancienne revisitée pour le projet Diamanti

La post-contrainte est une technique utilisée dans la construction pour renforcer les structures en béton. Elle n'est absolument pas nouvelle en soi, puisqu'elle a été inventée par Eugène Freyssinet (1879-1962) l'un des ingénieurs les plus influents du 20^e siècle. Ses travaux ont révolutionné la construction moderne, notamment en introduisant des techniques qui ont permis la création de structures plus résistantes et économiquement viables. Aujourd'hui, le béton précontraint est une technique standard utilisée dans le monde entier, attestant de l'importance des contributions de Freyssinet à l'ingénierie et à l'architecture modernes.

Ce qui est inédit avec le projet Diamanti, c'est que sa forme bio-inspirée implique une économie de matière, et donc oblige à repenser la conception et l'équilibre des forces appliquées. Là encore, il a beaucoup été question de calculs mathématiques et de tests, opérés avec l'appui du CERIB, particulièrement sur la résistance des pièces d'abouts, pour vérifier, avant d'appliquer la post-contrainte et de fabriquer l'ensemble, qu'elles pourraient supporter la tension à laquelle allaient être soumises.

Lorsqu'elle est utilisée efficacement, la précontrainte peut réduire considérablement la quantité de ferrailage nécessaire. En fait, si des matériaux très performants sont utilisés, moins d'armatures sont nécessaires, car elles peuvent en supporter davantage pour la même masse et la même section. D'autre part, dans ce projet particulier, les principes physiques de la précontrainte nous ont permis d'obtenir un comportement ductile, c'est-à-dire sans rupture brutale et spontanée. Au contraire, la déformation de la structure, sans effondrement, est nécessaire, sinon aucun ingénieur ou organisme de contrôle ne signerait la construction de telles structures, explique Léon Troussat Ingénieur structure chez Sika Technology.

Pour Ævia, si l'opération était inédite sur ce type de projet, elle n'était cependant pas inconnue, loin de là.

"Nous avons apporté notre savoir-faire à cet objet original, et adapté ce que l'on fait d'ordinaire pour construire des ponts ou des passerelles et assembler les voussoirs. Les grands principes sont les mêmes, et c'est tout l'intérêt"

Alain Simon,
Directeur technique chez ÆVIA



8.

UNE INNOVATION MAJEURE POUR DEMAIN

Le projet Diamanti est pour l'heure une œuvre d'art, mais sa vocation est de devenir fonctionnelle et de modifier les pratiques quotidiennes du secteur de la construction, ainsi que l'esthétique des villes. Elle offre la démonstration qu'elle n'était pas qu'une idée, mais bien une future passerelle piétonne capable de supporter 500 kg par mètre carré. Une preuve de concept qui permet de vérifier sa faisabilité, confirmer que la solution proposée fonctionne comme prévu, d'identifier les obstacles techniques, montrer aux parties prenantes que l'idée est bien viable et poursuivre ses améliorations éventuelles.



“L’innovation et la R&D sont deux activités bien distinctes, mais complémentaires.

***La R & D, c’est temps + argent = connaissance.
L’innovation, c’est temps + connaissance = argent.***

Nous avons assemblé des techniques industrielles existantes pour en faire quelque chose de nouveau. Désormais, il faut que cette solution trouve son marché. Sinon, elle restera une invention. Elle doit devenir une innovation, trouver son marché et se commercialiser”.

*Fabrice Decroix,
Directeur Innovation Sika France*



De la théorie à la pratique : Le projet Diamanti à l'épreuve du chargement

Dès le départ, la question de la viabilité et des performances du projet Diamanti dans le cadre d'une utilisation quotidienne réelle a été déterminante dans la mise en œuvre du projet - c'est pourquoi le prototype a été imaginé à l'échelle 1:1. L'une des étapes majeures du développement du projet Diamanti a donc été de le pousser au-delà de ses limites afin de mesurer sa capacité de résistance et son coefficient de sécurité. L'expérience a été menée au CERIB (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton), durant l'été 2024. Elle a permis de valider plusieurs aspects techniques de la future passerelle piétonne, avec des résultats qui ont dépassé les attentes.

La technique choisie pour l'essai est celle de la flexion quatre points : la poutre est placée sur deux appuis et deux poutres appliquent des charges en son centre, créant ainsi quatre points d'application de la force. Ce type d'essai permet d'évaluer la résistance et la déformation de la poutre sous des charges spécifiques, en vérifiant son comportement jusqu'à l'état limite de service (ELS) et l'état limite ultime (ELU). Il est essentiel pour les ingénieurs et les architectes, car il permet de vérifier le respect des normes de construction et d'identifier les points faibles de la conception.

Réunis au CERIB, les acteurs majeurs du projet ont assisté à l'épreuve. En tout, il aura fallu deux heures pour mener à bien l'expérience, en procédant étape par étape. Le chargement a été piloté en déplacement avec une vitesse imposée de 1,0 mm/s pour le chargement à l'état limite de service (ELS) et 3 mm/s pour le

chargement à l'état limite ultime (ELU), dans le but de bien contrôler et observer la déformation de la poutre. Le test a débuté avec l'application de cycles de chargement correspondant à l'état limite de service (ELS), visant à vérifier la rigidité flexionnelle, l'état de fissuration, et la flèche de la poutre. Des capteurs disposés au centre et sur les côtés de la poutre permettaient d'effectuer un suivi en temps réel des mesures de déformation.

Un facteur de sécurité de 2 qui ouvre le champ des possibles

À la fin de l'application du chargement correspondant à 100% de l'ELS, une déformation d'environ 1,5 mm a été observée, confirmant que le matériau se comportait de manière élastique sans aucune apparition de fissures. Lors de l'application d'un chargement correspondant à l'état limite ultime (ELU), une première fissure est apparue dans le béton, sans pour autant provoquer la rupture de la poutre ou une perte de sa capacité résistante, ce qui était le résultat attendu par les calculs. *"Nous avons constaté avec satisfaction que la fissure ne se situait pas à l'interface, mais qu'elle traversait deux couches imprimées"*, explique Fabrice Decroix. *"Cela prouve que le processus de fabrication a réussi à créer une bonne liaison entre les différentes couches, ce qui est essentiel pour la résistance structurelle. La présence d'une fissure traversante, sans rupture complète du matériau, montre que le matériau peut résister à des charges élevées tout en permettant une certaine déformation. Cela correspond aux attentes des matériaux précontraints, qui peuvent se fissurer sans se rompre"*. Une fissure traversante confirme également que les calculs théoriques et les simulations numériques effectués par Dr Masoud Akbarzadeh et son équipe avant le test étaient corrects.



Levage
lors des
essais au
CERIB.

Le test s'est poursuivi, allant encore plus loin, pour tenter de détruire la poutre. Impossible... Bien que poussée à la limite, à la course maximale de la presse, la structure n'a pas cédé. La poutre imprimée 3D précontrainte peut résister à des charges allant jusqu'à 200 kN = 20 T, soit plus de deux fois la limite ultime de l'état de conception, ce qui garantit un coefficient de sécurité plus que satisfaisant. - Nous savions que la structure était stable grâce aux calculs de l'équipe du Dr Masoud Akbarzadeh. Ce qui était moins prévisible, bien que les calculs et la structure aient été conçus de cette manière, c'était surtout le mode de défaillance. "Finalement, le coefficient de sécurité minimal est de 2, ce qui est un excellent résultat", déclare Fabrice Decroix.

Et demain ? La méthode de Masoud Akbarzadeh s'est adaptée au monde de la construction

Les résultats ont prouvé la viabilité de la poutre polyédrique précontrainte, ouvrant ainsi de réelles perspectives pour son utilisation future par les architectes et les constructeurs. Pour les professionnels de la construction, la possibilité de faire mieux avec moins est stupéfiante : on estime que cette approche permet de réduire de 60% la quantité de béton utilisée par rapport aux méthodes conventionnelles de béton armé. Elle permet également de réduire d'environ 95% la quantité d'armature en acier nécessaire par rapport à un système de plancher traditionnel, ce qui contribue à alléger la structure tout en maintenant sa résistance. Enfin, en optimisant la forme, la surface développée peut être augmentée de 60%, ce qui améliore l'efficacité de la structure. Ce projet ouvre de nombreuses perspectives économiques et surtout environnementales.

L'opportunité du bas-carbone

Le laboratoire de Masoud Akbarzadeh est financé par le Département de l'Énergie des États-Unis afin de promouvoir des méthodes de construction réduisant les émissions de carbone. C'est pour lui un objectif majeur. "Ce travail a essentiellement pour but d'aboutir sur une méthode de construction efficace et réduisant les émissions de carbone pour les structures de bâtiment", confie l'architecte.



"L'histoire va se poursuivre. Elle a été marquée par un grand enrichissement personnel à plusieurs niveaux. D'abord parce que nous avons tous appris des savoir-faire techniques de nos partenaires : chacun d'entre eux est le meilleur dans son domaine. Ensuite, parce que cette approche collaborative et partenariale, jalonnée de difficultés rencontrées en chemin, nous a permis de vivre une belle aventure humaine qui nous a tous enrichis".

Sylvain Dehaudt,

Directeur adjoint Propriété Industrielle et Valorisation au CERIB.

Le secteur de la construction a actuellement un très fort impact environnemental, estimé à 39% des émissions globales de CO₂ liées à l'énergie, selon le programme de l'ONU pour l'environnement. Une situation qui a empiré, avec une augmentation de 5% des émissions de CO₂ en 2021 par rapport à 2020. Le ciment Portland seul est responsable de 6-8% d'émissions de carbone par an. Et le béton armé est l'un des principaux contributeurs à cette émission de carbone. En ayant une structure la plus légère et la plus affinée possible, on parviendra à minimiser, sauvegarder, et enfin, préserver les ressources naturelles. "Ce projet ouvre de nombreux espoirs d'un point de vue économique et technique, mais aussi environnemental, confirme Alberto Arena, PDG de Carsey 3D. La quantité de matière première étant nettement moindre, nous aurons la capacité d'avoir un bilan carbone très favorable. C'est important pour nous de pouvoir apporter notre contribution à la décarbonation de la construction".

Le volume estimé du projet Diamanti est de l'ordre de 4 mètres cubes, contre 11 si l'on avait bâti une passerelle traditionnelle "pleine". Grâce au jeu des forces et à sa structure polyédrique, l'œuvre est à 75% "vide". Une donnée fascinante qui pourrait révolutionner la manière d'imaginer l'avenir des constructions.





“L’aspect le plus intéressant de ce projet est la fluidité avec laquelle tout s’est déroulé, même avec toutes les nouvelles techniques que nous avons introduites. Il n’est jamais facile de convaincre les gens d’innover, mais notre planification minutieuse a porté ses fruits. Nous avons même trouvé des moyens de nous améliorer au fur et à mesure. Nous avons confiance dans la technologie et les méthodes, et nous avons fini par faire encore mieux que ce à quoi nous nous attendions.”

Karolina Pajak, Department Leader 3D Printing

Un gain de temps et de matière

L’approche polyédrique combinée à l’impression 3D béton, permet structurellement de positionner la matière d’une manière plus économe, et de faire passer les câbles de précontrainte exactement là où se trouvent les lignes de force maximum. Or, qui dit moins de béton, dit moins d’acier. Car si la charge est plus faible, le besoin en armature l’est également.

« Il s’agit d’une approche optimisée à tous les niveaux. On ne pourrait pas être plus efficient, insiste Alain Simon, Directeur technique chez ÆVIA. En outre, le câble est gainé, graissé, donc il n’est pas soumis à la corrosion. Sans compter que le béton est un matériau qui nécessite très peu d’entretien par rapport au métal ou au bois. Voilà pourquoi nous sommes particulièrement confiants sur la durabilité du projet. J’espère vraiment que nous poursuivrons notre collaboration avec Sika et Carsey 3D afin de pouvoir, dans un avenir proche, l’appliquer à des systèmes de plancher et des structures capables de supporter des charges de service très élevées pour démontrer à grande échelle, pour un bâtiment complet, que nous pouvons réduire l’émission de carbone ».

Cette innovation porte aussi en elle des possibilités de rationalisation des coûts liées au mode de fabrication : l’impression 3D supprime de nombreuses étapes. De l’absence de moule découle l’élimination de toute une série d’étapes jusqu’ici exigeantes en temps et en main d’œuvre, ce qui modifie grandement les données pour une approche chantier beaucoup plus frugale. Autant d’atouts qui font que l’approche polyédrique de Masoud Akbarzadeh et son équipe est déjà convoitée par certains des plus grands cabinets d’architectes du monde.



LISTE DES CONTRIBUTEURS

UPENN

Masoud Akbarzadeh, Hua Chai, Yefan Zhi,
Maximilian E. Ororbia, Teng Teng,
Pouria Vakhshouri, Mathias Bernhard,
Damon Bolhassani, Javier Tapia,
Fahimeh Yavartanoo

SIKA

Karolina Pajak, Léon Troussel, Mylène Bernard,
Severin Mueller, Fabrice Decroix,
Noah Callantine, Marco Poltera

CARSEY 3D

Abdeslam Benamara, Valki Capron,
Alberto Arena, Remi Mechin

CERIB

Ibrahim Alachek, Sylvain Dehaut,
Armand Leroux, Matthieu Scalliet

AEVIA / EIFFAGE

Antoine Dupre, Alain Simon

SGH

Paul Kassabian, Blaise Waligun

CONTACTS PRESSE SIKA : CLC COMMUNICATIONS

Gilles Senneville • 06 09 93 03 46
Laurence Bachelot • 06 84 05 97 54
Charlène Brisset • 06 46 54 89 36
Lisa Amghar • 06 46 54 06 18
sikapresse@clccom.com