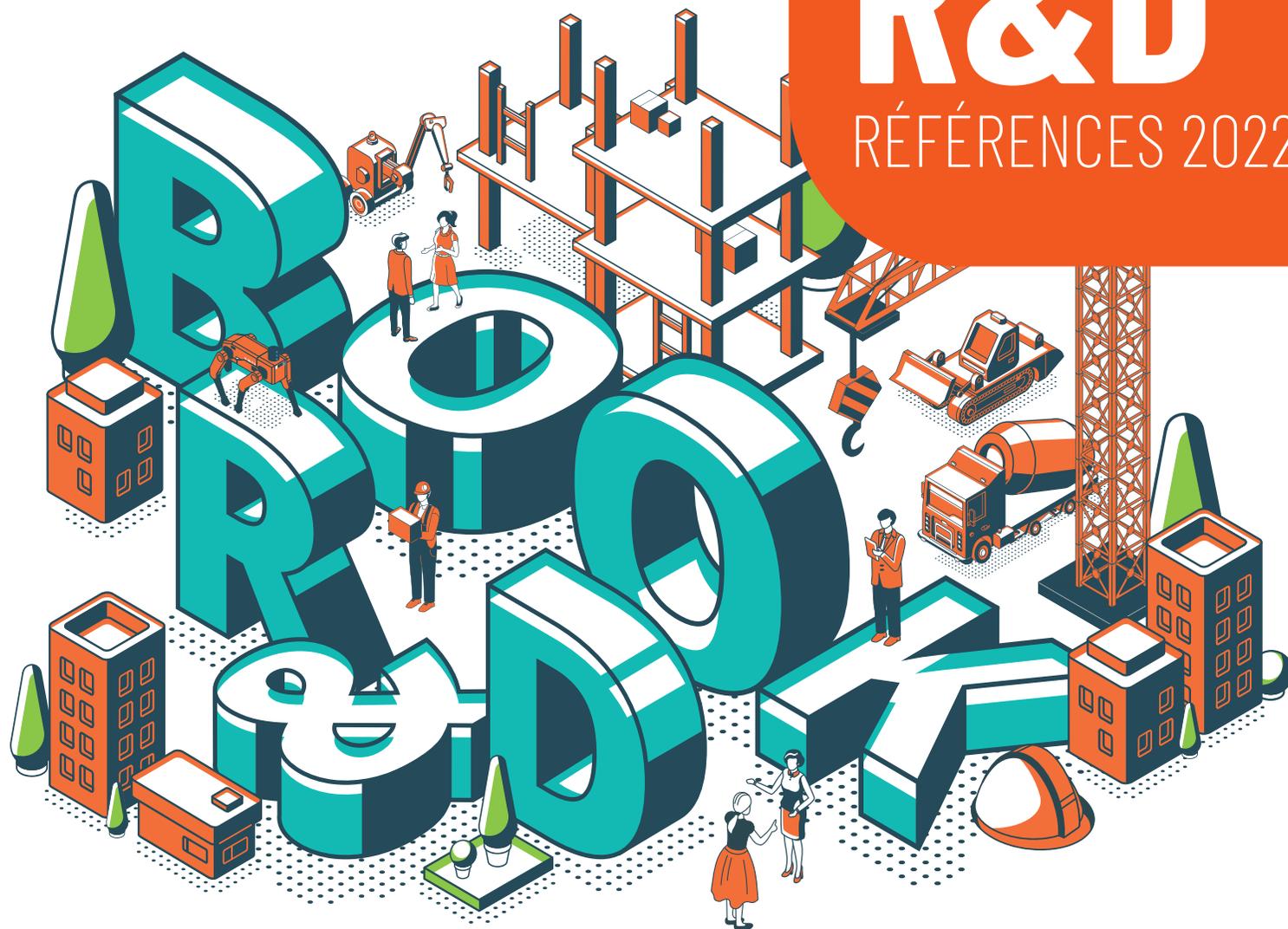


#2

R&D

RÉFÉRENCES 2022



**BOUYGUES**  
CONSTRUCTION

# ÉDITO



## Thiébault CLÉMENT

Directeur R&D Bouygues Construction

« Une R&D aussi visionnaire que pragmatique, qui concilie défrichage de nouvelles solutions et mise en oeuvre opérationnelle pour un passage du champ des possibles au champ du réel. Une R&D ouverte aussi vers l'extérieur, avec un écosystème d'acteurs internationaux, académiques et industriels. »

## DU CHAMP DES POSSIBLES AU CHAMP DU RÉEL

**La R&D de Bouygues Construction cherche, développe, teste et déploie des solutions innovantes pour répondre aux défis majeurs de nos clients, de la société et des territoires.**

La transition écologique est un axe majeur de notre stratégie. **La R&D continue ses travaux sur l'évolution des matériaux, l'amélioration des processus de conception et de construction ou la diminution des consommations énergétiques.**

La crise sanitaire a joué un rôle d'accélérateur sur l'évolution de nos modes de vie. Dans un monde post-pandémie, la R&D participe à concevoir des espaces plus flexibles, confortables, sains et sûrs. Elle repense les ouvrages comme des écosystèmes intelligents et connectés. Des ouvrages dans lesquels la donnée sert la performance énergétique, l'optimisation de l'exploitation-maintenance et l'expérience utilisateur. Elle étudie aussi des technologies émergentes telles que le jumeau numérique pour imaginer de nouveaux outils de collaboration qui facilitent la co-création et le pilotage de projet.

La guerre en Ukraine a posé avec plus d'acuité le problème des coûts et de l'approvisionnement en énergie et en matières premières. Les initiatives visant à réduire notre dépendance aux énergies fossiles et à soutenir le développement de filières de matériaux disponibles localement et peu transformés s'avèrent donc particulièrement importantes.

Les projets présentés dans cette publication poursuivent trois objectifs principaux : **accélérer les réponses aux enjeux environnementaux, intégrer les tendances émergentes et les nouveaux usages et accroître l'efficacité opérationnelle** grâce à la digitalisation de nos activités et à l'industrialisation de nos chantiers. Ils sont le fruit d'une R&D proche de nos chantiers, de nos ingénieries et à l'écoute de nos clients et des utilisateurs finaux.

Il s'agit en effet d'accompagner l'évolution de nos métiers, en apportant des innovations de rupture et en initiant des projets transverses à Bouygues Construction. **Les expérimentations de nouveaux matériaux bas carbone, l'opérateur connecté, la grue augmentée, la salle DesignLab et l'impression 3D** en sont des exemples représentatifs. Mais il s'agit également de garder un temps d'avance, en jouant un rôle de pionnier sur des nouvelles technologies encore peu matures.

Ce faisant, la R&D fait bouger les lignes et crée de nouvelles opportunités pour les projets de demain, permettant à Bouygues Construction de rester **un acteur de premier plan sur le marché de la construction et de la rénovation de bâtiments, d'infrastructures et de systèmes énergétiques.**

**Bouygues Construction Matériel** innove pour rechercher les meilleurs matériels et solutions associées, en conformité avec les exigences réglementaires en matière de santé et de sécurité.



Mathieu CALIBRE

**Bouygues Énergies & Services** et les autres filiales du pôle Énergies & Services développent des projets spécifiques aux « métiers » de :

- Services à la ville ;
- Systèmes de production et de stockage d'énergie décarbonée ;
- La mobilité électrique ;
- Infrastructures et réseaux urbains (éclairage public, etc.) ;
- L'industrie et de la maintenance prédictive ;
- Facility Management et des services aux occupants ou aux exploitants, rendus possibles par les technologies de réalité virtuelle et augmentée ainsi que par l'intelligence artificielle et le Big Data.



Servan LACIRE

Les recherches initiées par le **pôle quartiers durables** et les études conjointement menées avec des sociologues permettent de :

- Mieux appréhender les besoins et perceptions des usagers des quartiers pour penser autrement la ville et l'habitat de demain ;
- Engager un dialogue différent avec les collectivités ;
- Prendre en compte la résilience dans la conception : diminution des îlots de chaleur urbains, résistance aux phénomènes climatiques, etc. ;
- Proposer des mobilités innovantes, adaptées aux nouveaux usages.



Philippe RICHARD

La recherche menée par le **pôle Ergonomie** vise à assurer à l'ensemble des intervenants opérationnels, internes comme externes, les meilleures conditions de santé et de sécurité dans leurs activités. Cela passe par la réduction à l'exposition aux risques majeurs, en particulier ceux induits par les engins présents sur les chantiers.



Damien BAHON

Le **Construction Lab** anticipe le chantier du futur dans les domaines du bâtiment, des infrastructures, des énergies et des services. Sa mission est de :

- Identifier les besoins futurs des opérationnels de chantier et les verrous technologiques associés ;
- Développer et prototyper des propositions techniques pour y parvenir ;
- Tester par itération ces solutions pour les amener à maturité.



Bruno LINÉATTE

Le pôle dédié aux **modes constructifs** s'attache à :

- Industrialiser les procédés de conception et de construction pour apporter de la valeur aux clients et diminuer l'impact environnemental de Bouygues Construction ;
- Expérimenter de nouvelles façons de construire, notamment avec la construction bois et des matériaux biosourcés.



Christian de NACQUARD

Les équipes du **pôle Éco-conception** :

- Apportent des outils et des solutions innovantes permettant de limiter le recours à des ressources non renouvelables ;
- Développent un processus complet de conception résiliente face aux aléas climatiques ;
- Explorent des solutions de puits de carbone.



Christian CREMONA

Les équipes de R&D dédiées à la **performance énergétique** travaillent à :

- Massifier la rénovation énergétique sur l'ensemble des typologies de bâtiment ;
- Digitaliser et contractualiser la performance énergétique pour enrichir les offres de services de Bouygues Construction ;
- Concevoir des bâtiments et des îlots très haute performance énergétique et producteurs d'énergie renouvelable.



Amélie VENEROSY

Les études menées par le **pôle Matériaux et Structures** élaborent de nouvelles solutions pour :

- Construire des bâtiments et ouvrages plus respectueux de l'environnement grâce à des technologies de matériaux plus économes en ressources et à faible intensité carbone, etc. ;
- Étendre les champs d'application des nouvelles technologies de construction ;
- Prolonger la durée de vie des ouvrages.

Les recherches réalisées sur le sujet du **bâtiment connecté** ont pour objectifs de :

- Investiguer, étudier, tester et comparer les nouveaux outils d'exploitation ;
- Identifier, comparer et intégrer des nouvelles technologies de l'information et de la communication à l'ensemble de la chaîne de valeur.

Les travaux de R&D de **VSL** permettent de développer des systèmes spécifiques pour améliorer la durabilité des ouvrages précontraints et haubanés.



Rachid ANNAN



Laure DUCOULOMBIER



Les travaux du pôle **DesignLab** offrent la possibilité de :

- Optimiser la conception des ouvrages à partir d'algorithmes multi-métiers pour maîtriser, rationaliser et augmenter la valeur des projets ;
- Identifier le potentiel des technologies numériques, comme la réalité virtuelle et la réalité augmentée, pour assurer une formation sans risque à nos compagnons, une immersion interactive dans leurs projets de construction aux clients, architectes, sous-traitants, et faciliter l'utilisation du BIM sur les chantiers ;
- Investiguer les possibilités offertes par les Jumeaux Numériques sur toute la chaîne de valeur de la construction et de l'exploitation.

Nicolas BRAUD



Le **LabTP** traite des sujets relatifs à l'innovation, au digital et au Big Data pour Bouygues Travaux Publics. Il développe des produits et des services sur mesure pour répondre aux besoins des chantiers. Son équipe est spécialisée en assemblage de technologies hybrides.

# La R&D Bouygues Construction



# /01

## ACCÉLÉRER LES RÉPONSES AUX ENJEUX DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

|                              |    |
|------------------------------|----|
| Matériaux                    | 10 |
| Construction bois            | 14 |
| Durabilité                   | 16 |
| Performance énergétique      | 18 |
| Baisse des émissions carbone | 20 |
| Circularité                  | 24 |



# /02

## ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ OPÉRATIONNELLE

|                    |    |
|--------------------|----|
| Digital            | 28 |
| Opérateur chantier | 40 |
| Industrialisation  | 44 |
| Safety             | 52 |



# /03

## INTÉGRER LES TENDANCES ÉMERGENTES ET LES NOUVEAUX USAGES

|          |    |
|----------|----|
| Bâtiment | 60 |
| Ville    | 64 |





# /01

## ACCÉLÉRER LES RÉPONSES AUX ENJEUX DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGETIQUE

LA R&D CATALYSE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE DE LA CONSTRUCTION SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DES BÂTIMENTS ET DES INFRASTRUCTURES.

Nos ouvrages sont éco-construits et bas carbone. Ils privilégient les matériaux et les procédés de construction faiblement émissifs en CO<sub>2</sub>, ainsi que les matières premières secondaires. Ils sont efficaces, voire à énergie positive, qu'ils soient neufs ou rénovés. La performance énergétique guide la conception, la réalisation et l'exploitation de tous nos projets. Ils deviennent aussi circulaires, réversibles et démontables et produisent de plus en plus de connaissance et de valeur pour les habitants et l'environnement.

# MATÉRIAUX



## LES TERRES D'EXCAVATION, UN GISEMENT À EXPLOITER

La réalisation de tunnels et d'ouvrages souterrains génère d'importantes quantités de terre qui sont, la plupart du temps, évacuées et traitées comme déblais. Il est pourtant possible de les réutiliser pour produire du béton bas carbone. **Le pôle R&D Matériaux et Structures veut permettre la valorisation des déblais du Grand Paris**, quelles que soient la nature des sols et la technique d'excavation utilisée. Les résultats des essais menés en laboratoire sur trois types de déblais ont montré qu'il est possible de **substituer jusqu'à 20 % de sable dans le béton sans détériorer ses performances**. Cette solution d'économie circulaire est mise en œuvre sur le chantier du prolongement du tramway T3, avec des déblais issus des travaux de la Porte Maillot.

## DÉVELOPPER L'INDUSTRIALISATION DE LA TERRE CRUE

L'Arena Porte de la Chapelle, future salle polyvalente au Nord de Paris, devrait intégrer des murs en briques de terre crue, fabriquée à partir des déblais du chantier du Grand Paris. **La construction en terre crue, utilisée pour la réalisation de murs non porteurs, en remplissage de cloison ou en enduit, par exemple, présente de nombreux atouts environnementaux** mais la fabrication de ce matériau géosourcé reste encore artisanale. Comment passer à un processus industrialisé et économiquement viable pour obtenir un matériau compatible avec les exigences des chantiers de demain (en matière de temps de démoulage, de performances mécaniques ou de durabilité) ? C'est l'objet d'une étude menée au sein du pôle R&D Matériaux et Structures qui réalise des essais sur plusieurs liants bas carbone permettant de stabiliser la terre crue afin d'améliorer ses propriétés.

## LES LAITIERS ALCALI-ACTIVÉS GAGNENT EN MATURITÉ

H-UKR est un ciment sans clinker à base de laitiers alcali-activés permettant l'obtention de bétons bas carbone. Grâce aux travaux de **Bouygues Construction** et **Hoffman Green Cement Technologies** (HGCT), ces matériaux acquièrent une maturité industrielle pour des applications dans le secteur de la construction.

En 2021, les Archives Départementales du Loiret ont constitué la première mise en œuvre complète de la technologie H-UKR, de la formulation du béton aux notes de calcul pour la réalisation réussie de poteaux et d'un plancher de 500 m<sup>2</sup>.

En 2022, le déploiement de ce liant sans clinker sur des ouvrages verticaux et horizontaux de la sortie de secours de la nouvelle gare d'Issy-les-Moulineaux dans le cadre du chantier T3A s'inscrit dans la même démarche.



Christian CREMONA, directeur de la R&D Matériaux et Structures



Fabrication d'un mur acoustique sur l'autoroute A10

## UN CIMENT SANS CLINKER POUR UN BÉTON ULTRA-BAS CARBONE



Bouygues Construction fait entrer le béton dans une nouvelle ère pour relever les défis de l'urbanisation durable. La démarche R&D du Groupe dans le domaine des bétons bas carbone s'articule aujourd'hui autour de trois axes : **optimiser et accroître l'utilisation des ciments à faible impact carbone**, en précisant leurs modalités d'emploi ; **généraliser l'usage des laitiers alcali-activés, des liants sans clinker** (principal constituant du ciment, dont la production est fortement émettrice de CO<sub>2</sub>) et **développer des ciments à base d'argiles calcinées**. Cette ressource offre, en effet, un plus large potentiel que les laitiers, disponibles en quantité limitée et inégalement répartis au niveau mondial. Les travaux menés par le pôle R&D Matériaux et Structures, Hoffmann Green Cement Technologies (HGCT) et Chryso s'inscrivent dans ce troisième axe.

En 2019, Bouygues Construction a signé un contrat de collaboration avec le cimentier pour formuler des solutions de béton utilisant un nouveau ciment fabriqué à partir de la **technologie H-EVA** (activation alcaline d'argile calcinée flash avec prise ettringite). Suite aux premières études menées en 2020 et 2021, l'adjuvantier Chryso a rejoint le partenariat pour développer un adjuvant permettant d'améliorer la rhéologie du ciment H-EVA.

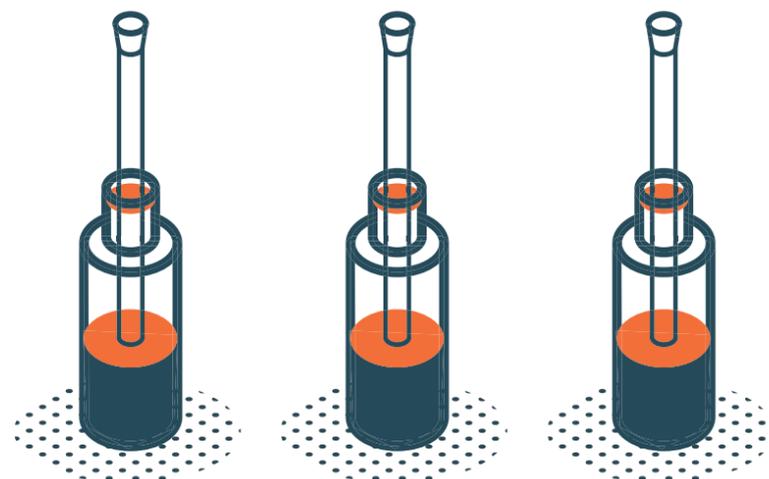
Au début de l'année 2022, une grande campagne d'essais a été lancée au sein du pôle Ingénierie Matériaux, dirigé par Christian CREMONA, pour évaluer les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques de ce ciment. **« Ces essais doivent nous permettre de constituer le dossier technique qui sera remis au CSTB pour l'obtention d'une ETPM (Évaluation Technique de Produits et Matériaux) en vue d'une mise en œuvre opérationnelle, »** explique Christian CREMONA. La première application visée concerne le béton coulé sur site pour la construction de bâtiments. Par ailleurs, la technologie est en cours d'expérimentation sur le chantier de la nouvelle usine de HGCT en Vendée pour le coulage de dalles béton.

**Permettant de s'affranchir du clinker grâce à une technologie novatrice, le ciment H-EVA vise une empreinte carbone réduite de 70 à 80 % par rapport à un ciment Portland traditionnel.**

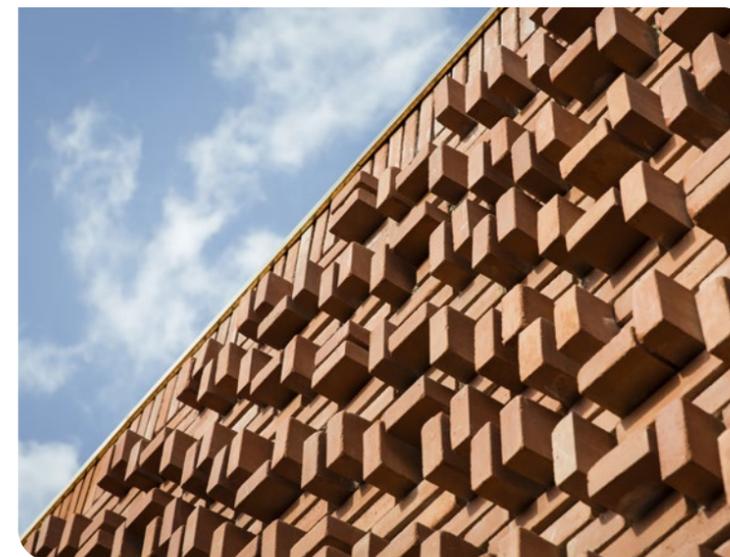
## UN BÉTON CIRCULAIRE À BASE DE MÂCHEFER

Les mâchefers issus de l'incinération de déchets non dangereux pourraient partiellement remplacer les granulats naturels utilisés dans le béton. Cette valorisation répond à la double problématique de la raréfaction des ressources et de l'impact environnemental de l'élimination des déchets. Elle constitue également une solution intéressante pour réduire l'empreinte écologique du béton.

**Les travaux de recherche menés dans le cadre des activités du pôle R&D Matériaux et Structures visent à formuler un béton à base de mâchefer aussi performant que les bétons prêts à l'emploi traditionnels, à un coût compétitif.** Un défi, en raison de la forte absorption d'eau de ce matériau. Plusieurs tests sont menés pour améliorer les performances du produit et augmenter la part de mâchefer dans la formulation.



*Développement d'un protocole spécifique pour la mesure d'absorption d'eau des mâchefers*



*Projet Yves Saint Laurent à Marrakech*

## LE BÉTON ARMÉ FIBRÉ OPTIMISE L'UTILISATION DE L'ACIER

En remplaçant les armatures en acier traditionnelles utilisées dans le béton armé, le béton fibré permet d'économiser d'importantes quantités de métal. Ce matériau a notamment été utilisé en 2018 par Bouygues Travaux Publics pour la fabrication de voussoirs sur une portion du prolongement de la ligne 14 du métro parisien. Une première française !

**Le pôle R&D Matériaux et Structures étudie actuellement l'utilisation du béton fibré par fibres métalliques, en conjonction avec des armatures passives.** Les travaux de recherche proposent notamment de lever des incertitudes concernant les propriétés de différentes familles de bétons fibrés, leurs possibilités d'application, leur mise en œuvre et leur durabilité. **Le pôle espère faciliter l'emploi de ce matériau d'avenir qui pourrait permettre de réduire le taux d'armatures jusqu'à 20 %.**

## ÉLARGIR LES DOMAINES D'EMPLOIS DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS ET GÉOSOURCÉS

Pour massifier leur utilisation dans la construction et la rénovation, la R&D de Bouygues Construction participe activement – à travers des essais – à leur encadrement technique, qui se concrétise notamment par l'élaboration de règles professionnelles ou l'obtention d'ATEX (Appréciations Techniques d'Expérimentation). **Elle réalise une veille technique des solutions existantes et identifie des partenaires industriels potentiels.** Elle fournit également un accompagnement au changement, en apportant aux équipes opérationnelles les outils nécessaires pour véritablement **« concevoir biosourcé »** et mettre en œuvre de nouveaux produits et procédés sur les chantiers.

*« Locaux, abondants, peu transformés, les matériaux biosourcés et géosourcés tels que la paille, le chanvre ou la terre crue répondent à plusieurs enjeux. Ils peuvent jouer un rôle important dans la décarbonation du bâtiment, le développement économique territorial, le confort et la résilience, à la fois climatique et de la chaîne d'approvisionnement. »*

*Thierry JOST, responsable éco-conception*

# BOIS CONSTRUCTION

## DÉVELOPPER L'USAGE DU BOIS SUR TOUT LE CYCLE DE VIE DE LA CONSTRUCTION

Écologique, le bois possède des qualités techniques intrinsèques qui en font un matériau d'avenir pour la construction. Construire en bois permet d'économiser entre 20 et 30 % de CO<sub>2</sub> selon les configurations par rapport à une construction en béton. Fort de ce constat, **Bouygues Construction a engagé une stratégie ambitieuse à travers la démarche d'entreprise WeWood pour développer l'utilisation de cette ressource, en se fixant pour objectif d'atteindre 30 % de projets de bâtiments en bois en 2030.** Les efforts du pôle portent sur tout le cycle de vie du bâtiment, de l'approvisionnement à la fin de vie.

Aussi a-t-il lancé, en partenariat avec l'École Supérieure du Bois, une vaste étude de la ressource forestière, combinant analyse stratégique de la filière et des disponibilités en bois au niveau national. « **L'objectif est d'évaluer la capacité de la forêt française à répondre à nos besoins actuels et futurs, en faisant la distinction entre les bois résineux et les bois feuillus,** » décrit Bruno LINÉATTE. Côté conception, la R&D a développé de nombreuses solutions constructives. Citons, par exemple, le projet de salles de classe modulaires 3D en bois préfabriquées en usine, mené avec la société TH, ou le procédé Mix3B (Mixité Bois Béton Bouygues), un système constructif exclusif intégrant la pose des murs à ossature bois dans le cycle du gros-œuvre.

Bouygues Construction multiplie les projets visant à intégrer des systèmes constructifs bois associés à la mise en œuvre de matériaux biosourcés, notamment avec les isolants, comme celui mené en partenariat avec l'École Supérieure du Bois de Nantes. La démontabilité des façades est elle aussi explorée.

Par ces différents travaux, qui se sont déjà concrétisés à travers de nouvelles solutions mises en œuvre dans différents projets du Groupe, la R&D cherche toujours à travailler la compétitivité du bois face au béton, à trouver l'optimum entre la qualité de construction et d'usage et le prix. C'est un levier essentiel pour réussir à libérer le potentiel de ce matériau d'avenir, le mettre au service de tous nos clients et, in fine, apporter de véritables ruptures dans notre manière de construire.

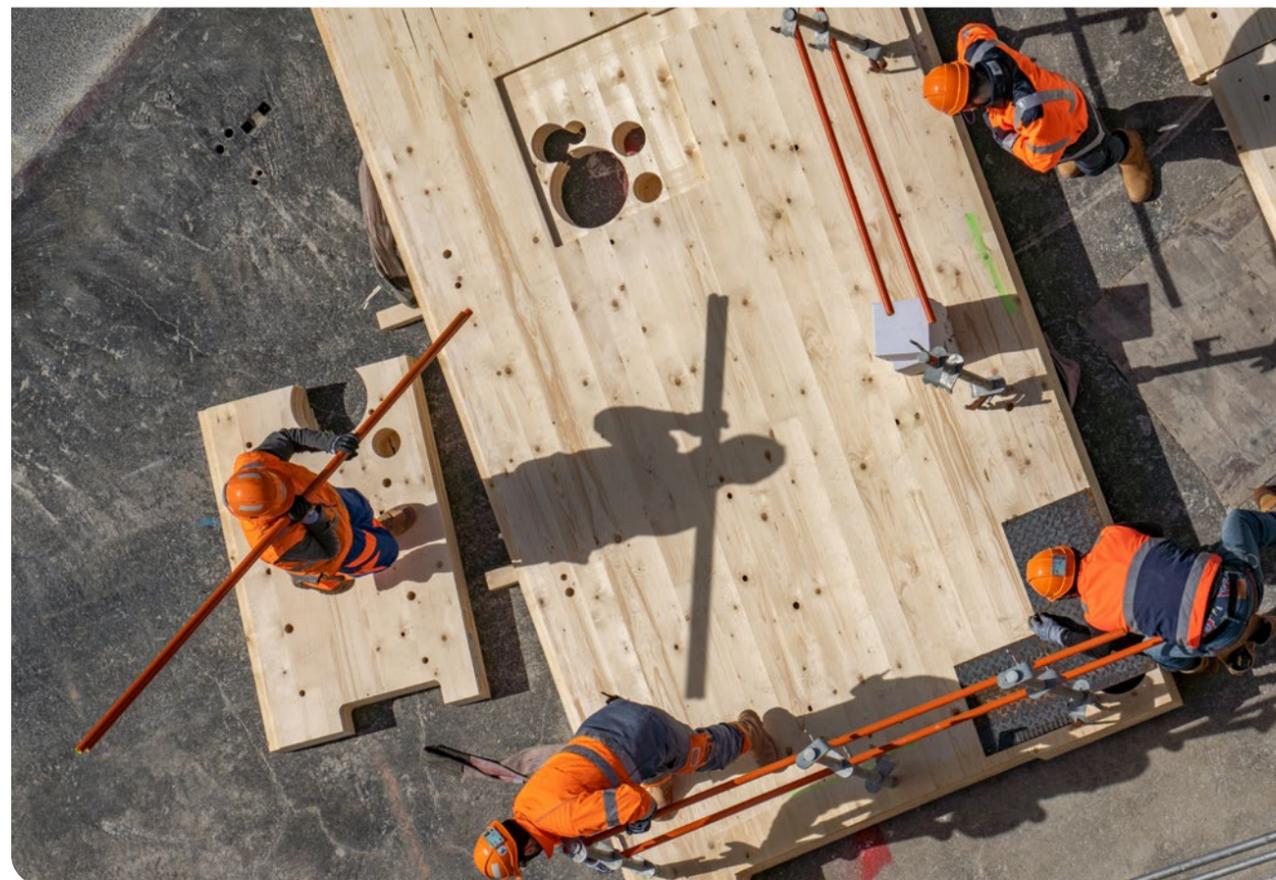
*« Ce sont des constructions qui intègrent une part importante de structure bois ou de façade à ossature bois et qui nous permettent de progresser sur la réduction de notre empreinte carbone. »*

Bruno LINÉATTE, directeur R&D Modes constructifs

## Avec l'ESB, nous levons les verrous technologiques de la construction bois

Bouygues Construction entretient des relations privilégiées avec l'École Supérieure du Bois de Nantes (ESB) depuis près de dix ans. Véritable vivier de talents, l'ESB a déjà contribué à plusieurs de ses projets R&D tels que PANOBLOC Performance, solution de panneaux composites bois/isolant industrialisés. Ses liens avec le Groupe lui permettent de rapprocher ses étudiants du monde de l'entreprise.

En juin 2022, les deux partenaires ont annoncé la création d'une chaire de recherche visant à mutualiser les compétences et à lever les verrous technologiques de la construction bois. Cela se traduira notamment par le lancement de projets R&D collaboratifs (recherche de solutions biosourcées performantes face aux risques d'incendie, de vieillissement, d'humidité, d'attaques fongiques, etc.).



## LE MARIAGE HEUREUX DU BOIS ET DU BÉTON

Bouygues Construction développe des modes constructifs associant le bois et le béton. Cette mixité permet de combiner les avantages intrinsèques des deux matériaux : **l'empreinte carbone réduite du bois et les performances acoustiques du béton**, par exemple.

Parmi les travaux actuellement en cours, la R&D mène **une étude comparative de plancher mixte**. Il s'agit d'évaluer le potentiel de ces solutions dans différentes configurations (bureaux, établissements scolaires) en tenant compte de plusieurs critères, en particulier leur prix et leur bilan carbone.

# DURABILITÉ

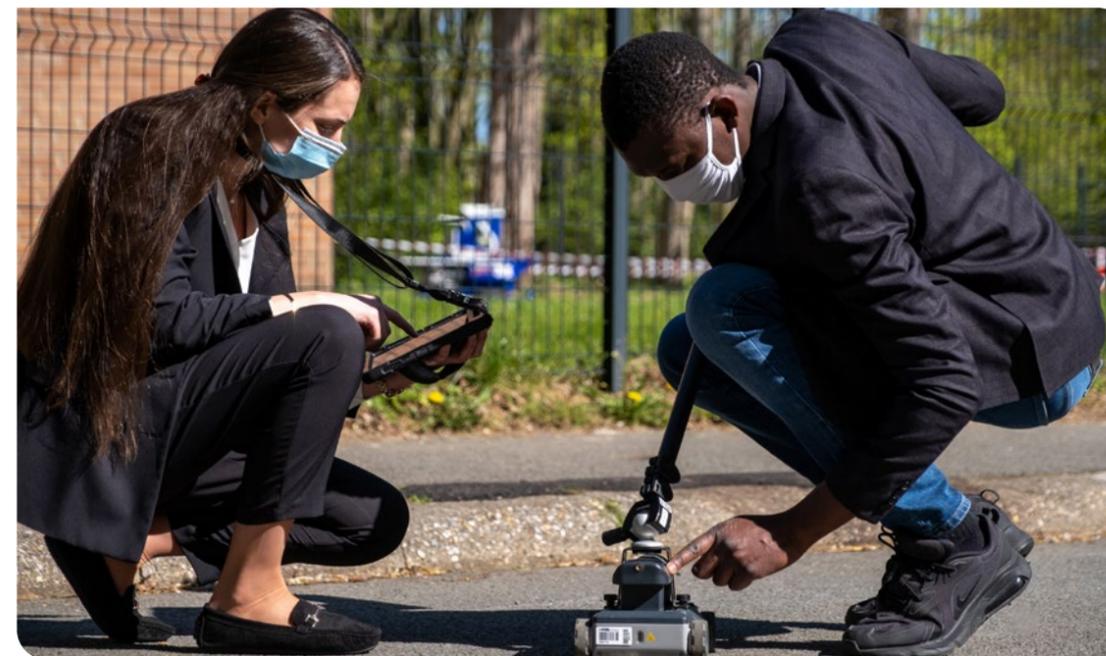


Ludovic REVERDY, responsable adjoint  
de la Chaire Construction 4.0

## LA CHAIRE CONSTRUCTION 4.0 DÉFRICHE LA MAINTENANCE PRÉVISIONNELLE DES PONTS

L'effondrement du pont Morandi à Gênes en 2018 a constitué un rappel brutal de l'importance de la surveillance et de l'entretien des ponts. La tâche est titanesque. **Rien qu'en France, il existe 200 000 à 250 000 ponts routiers, dont 10 % au moins seraient « en mauvais état structurel »**, selon un rapport du Sénat. Pour préserver efficacement ce type d'ouvrages, VSL, filiale de Bouygues Construction spécialiste des structures haubanées en béton précontraint, adopte une nouvelle approche scientifique : la maintenance prévisionnelle. VSL s'est associé à la Chaire Construction 4.0 pour évaluer le potentiel du big data et de l'intelligence artificielle pour la maintenance des ponts, en analysant les données existantes (rapports d'inspection, photos, résultats d'essais non destructifs, caractéristiques générales des ponts, bases de données nationales, etc.).

« L'objectif du projet est de pouvoir identifier automatiquement les dégradations, mieux les comprendre et anticiper leur évolution dans le temps afin d'orienter les travaux de rénovation ou de réparation. »



L'équipe de recherche a fourni un important travail de défrichage. Il s'agissait d'abord de consolider, structurer et intégrer les données dans un système d'information. « **La Chaire a proposé un processus d'ingestion des données captées sur le terrain pour mieux les traiter et les analyser** », explique Ludovic REVERDY. Il s'agissait ensuite d'étudier différents algorithmes pour interpréter ces données et détecter des schémas de dégradations dans les ponts. Cette recherche doit servir de base au développement d'un algorithme prévisionnel capable d'évaluer le risque de détérioration et de prévoir son évolution future ; un formidable outil d'aide à la décision, permettant à VSL d'optimiser la longévité et la disponibilité des ouvrages tout en minimisant les coûts de maintenance pour ses clients.

## La Chaire Construction 4.0 passe à la vitesse supérieure

Créée il y a cinq ans par Bouygues Construction et Centrale Lille pour transformer les métiers de la construction, la **Chaire Construction 4.0** a donné naissance à de nombreux projets de recherche innovants : conception d'un outil d'aide à la sélection de modes constructifs, développement d'un prototype d'imprimante 3D à mortier, mise en place d'une logistique optimisée sur les chantiers...

Mais l'un des plus beaux succès de cette collaboration aura été de recruter plusieurs doctorants qui enrichissent aujourd'hui la R&D du Groupe. Fortes de ces réussites, les deux entités lancent le deuxième cycle de la Chaire, qu'elles souhaitent désormais ouvrir à d'autres acteurs industriels.

Découvrez la Chaire  
Construction 4.0 !



CHAIRECONSTRUCTION4.0

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

## LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE EN 1 CLIC !

DataWatcher est un outil numérique développé par la R&D du Groupe avec le DataLab. Alliant expertise métier et algorithme, il permet de vérifier que les capteurs installés dans un bâtiment pour son pilotage sont bien connectés et fournissent des données fiables. « D'une part, c'est fondamental pour le commissionnement de nos opérations que nous devons livrer toujours plus vite et avec toujours plus d'équipements. D'autre part, les données de qualité récoltées nous permettent de suivre en temps réel le respect de nos engagements et d'agir très rapidement en cas de dérives », explique Maxime HUGONNET, coordinateur de

la plateforme chez Bouygues Construction. « Cet outil nous aidera à optimiser la conception des futurs projets. Si l'on constate qu'un quart des systèmes de refroidissement sont inutilisés, même dans des cas de canicules extrêmes, on en installera moins dans les prochains bâtiments, ce qui réduira leur empreinte carbone et leur coût. »

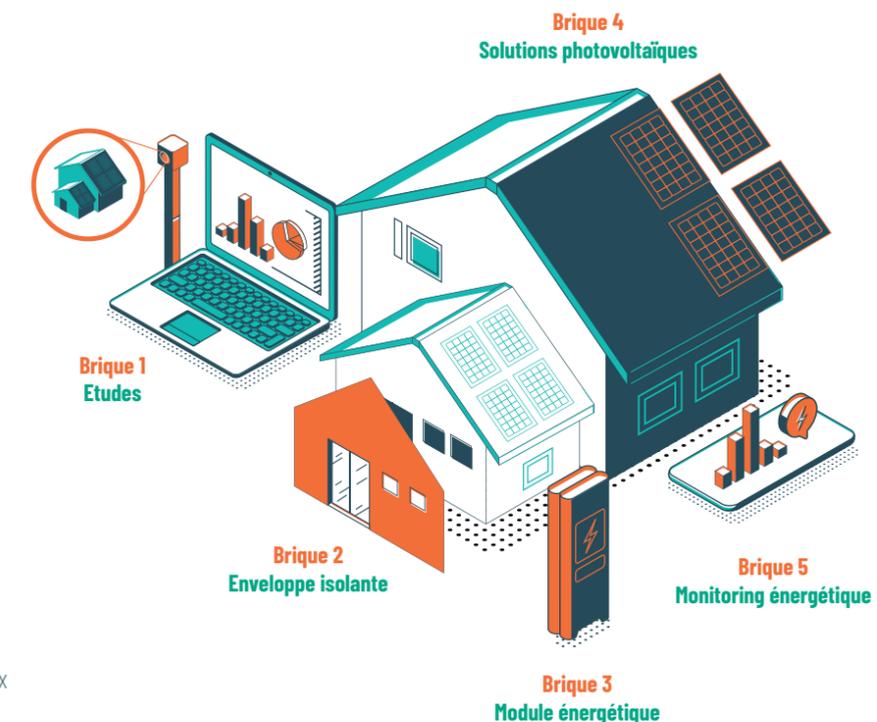
La phase de prototypage de l'outil DataWatcher est maintenant finalisée avec des résultats très satisfaisants. En 2022, l'équipe R&D s'engagera dans une démarche de pré-industrialisation sur une vingtaine de projets.

## LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE FAIT UN GRAND SAUT EN AVANT

BYSprong est le programme R&D de Bouygues Construction pour massifier la rénovation énergétique face à l'urgence climatique. Il répond au défi européen EnergieSprong qui propose de démocratiser la transformation des bâtiments énergivores en bâtiments à énergie positive. Ce programme développe des solutions industrialisées, permettant au Groupe d'augmenter la qualité et la quantité de ses rénovations énergétiques et de jouer pleinement son rôle d'acteur majeur de la transition écologique. BYSprong s'articule autour de cinq solutions que nos équipes peuvent utiliser séparément ou assembler en fonction des besoins de leurs clients :

- Des **études automatisées et simplifiées** qui permettent d'obtenir, en fonction d'une étiquette énergétique cible, un bouquet de travaux optimal et, prochainement, un bilan carbone ainsi qu'une estimation du coût des travaux ;
- Une **enveloppe isolante pré-fabriquée**. Manuportable, biosourcée et réalisée avec des partenaires industriels locaux, elle permet de réduire au maximum la gêne des travaux pour les résidents. Déjà disponible pour la maison individuelle, nos équipes conçoivent actuellement des solutions pour les logements collectifs ;
- Un **module énergétique tout-en-un intégré à la façade**, qui gère la consommation pour le chauffage, l'eau chaude et la ventilation ainsi que la production photovoltaïque ;
- Une **toiture photovoltaïque** pour la production d'énergie renouvelable, pouvant être associée à une démarche tiers-financement ;
- Un **système de monitoring** qui permet au résident, au bailleur et au mainteneur de surveiller, piloter et optimiser simplement la consommation énergétique. Véritable colonne vertébrale numérique de la performance énergétique, il permet au Groupe de s'inscrire dans le temps long avec ses clients et d'être un acteur central dans la donnée du bâtiment ;

Grâce à cette démarche innovante, Bouygues Construction rénove déjà plus de 500 logements, comme à Angers avec le chantier de réhabilitation de logements Domaine d'Auvergne pour le bailleur social Podeliha, quand plus de 6 000 sont ciblés ou à l'étude en France dans le cadre d'EnergieSprong. L'objectif de la R&D est désormais de transposer ces différentes composantes à l'immobilier scolaire et tertiaire.



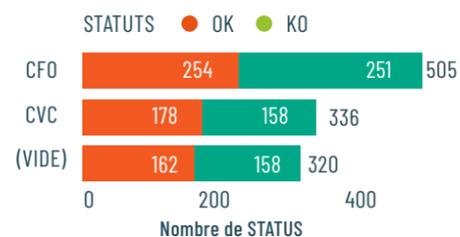
Maxime HUGONNET, responsable de projets R&D

BYSprong

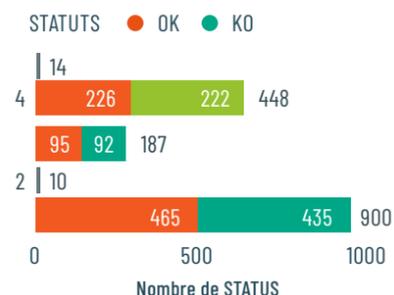


BySprong pour accélérer la rénovation énergétique

### DÉTAILS DU FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS PAR LOT



### DÉTAILS DU FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS SELON DIFFÉRENTS TESTS



### VISION GLOBALE ET INSTANTANÉE DU FONCTIONNEMENT DE L'ENSEMBLE DES CAPTEURS D'UN SITE

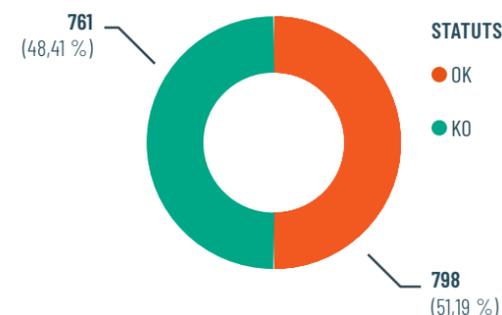


Tableau de bord DataWatcher permettant de suivre le fonctionnement de l'ensemble des capteurs d'un site (1 559 capteurs dans cet exemple)

# BAISSE DES ÉMISSIONS CARBONE



## LES ESPACES VERTS, UN ATOUT POUR LA CONCEPTION DE PROJETS ZÉRO ÉMISSION NETTE

Dans le cadre des projets immobiliers, les lots espaces verts représentent un élément intéressant à examiner dans le cadre d'une stratégie zéro émission nette. Partant de ce constat, le projet Clovers, mené au sein de Bouygues Bâtiment France, comporte deux volets.

Le premier volet **permet de calculer le poids carbone des espaces verts** – actuellement non intégré dans l'analyse du cycle de vie des projets –, afin d'identifier ensuite les leviers de réduction des émissions carbone.

Le second volet **vise à quantifier la séquestration du carbone** de ces lots et leurs bénéfices pour la gestion de l'eau, la biodiversité, la création d'îlots de fraîcheur et la dépollution grâce au développement d'une méthodologie certifiée par le Label Bas-Carbone du Ministère de la Transition écologique. Les premiers résultats de la démarche ont montré que la réalisation d'un lot espace vert (sur un projet de construction représentatif) émet 36 t eqCO<sub>2</sub>, tandis qu'il permet de stocker 92 t eqCO<sub>2</sub> lors de sa phase d'exploitation (sur 50 ans).

## CLEANMUD, UNE SOLUTION DURABLE POUR LA GESTION DES BOUES DE TUNNELIER

Pour pouvoir évacuer et traiter le mélange de déblais et de boue bentonitique issu de l'excavation d'un terrain par un tunnelier à pression de boues, il est nécessaire d'ajouter de la chaux. Elle donne de la consistance à la boue et permet de la presser pour séparer la terre et l'eau. Mais la chaux est un élément polluant qui fait augmenter le pH de l'eau en sortie des filtres-presses. Cela implique d'ajouter ensuite de l'acide pour diminuer ce pH afin de pouvoir rejeter l'eau sans risque.

CleanMud vise à supprimer la chaux dans le traitement des boues de tunnelier en la remplaçant par un produit chimique plus respectueux de l'environnement, potentiellement d'origine biologique. Cela fait plusieurs années que le LabTP mène des expérimentations sur cette solution innovante, en France et à l'étranger, qu'il a réussi à industrialiser avec l'aide de son partenaire.

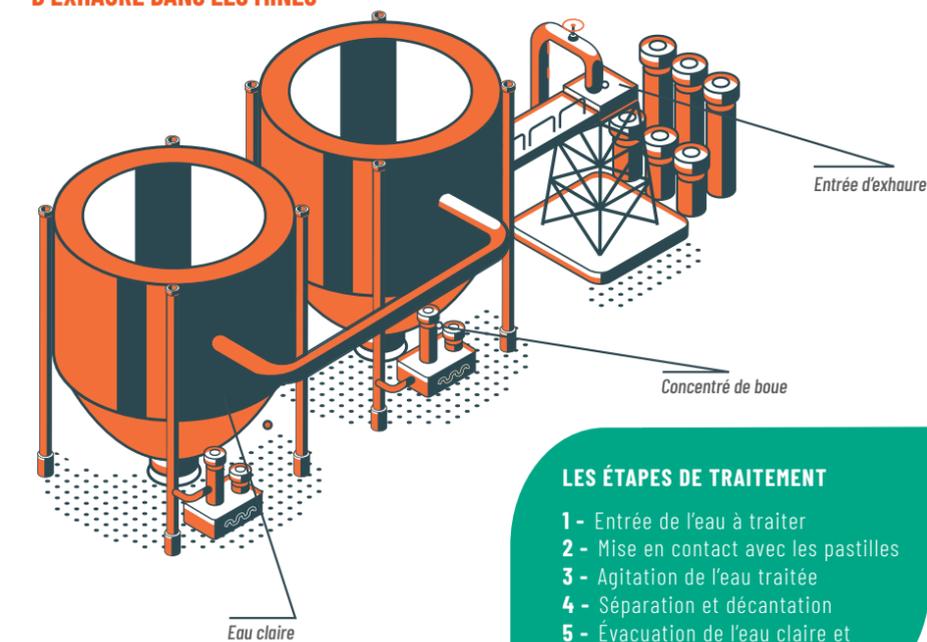
Son intérêt est multiple. D'une part, elle permet d'utiliser un produit – dont la composition dépend de la géologie du terrain à excaver – moins coûteux que la chaux et dans des quantités moins importantes. **« Sur le projet pilote mené sur le chantier T2A du Grand Paris Express, nous avons réussi à presser les boues argileuses avec des produits chimiques issus de végétaux »**, explique Nicolas BRAUD, directeur du LabTP.

D'autre part, CleanMud évite la pollution des déblais – éliminant les frais supplémentaires associés à leur évacuation, l'augmentation du pH de l'eau et donc, l'ajout d'acide. Il en résulte une meilleure empreinte environnementale du chantier, mais également d'importantes économies. Sur un chantier à Melbourne où CleanMud a été déployé en production pendant six mois ; le gain financier s'est élevé à plusieurs dizaines de milliers d'euros par jour.

« Nous disposons aujourd'hui d'une solution opérationnelle qui a montré de très bons résultats que l'on sait mettre en œuvre sur différents chantiers et que l'on propose à nos clients en phase d'appel d'offres. »

Nicolas BRAUD, directeur du LabTP

### TRAITEMENT DES EAUX D'EXHAURE DANS LES MINES



#### LES ÉTAPES DE TRAITEMENT

- 1 - Entrée de l'eau à traiter
- 2 - Mise en contact avec les pastilles
- 3 - Agitation de l'eau traitée
- 4 - Séparation et décantation
- 5 - Évacuation de l'eau claire et du concentré de boue

## UN PARTENARIAT AU SERVICE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Bouygues Énergies & Services et PowiDian, spécialisé dans la conception de stations d'énergies renouvelables autonomes et intelligentes, collaborent depuis 2020 pour développer les applications mobiles et stationnaires de l'hydrogène. En 2021, la start-up lançait sa filiale dédiée à la mobilité dans le but de commercialiser des véhicules utilitaires à hydrogène : une démarche soutenue par Bouygues Énergies & Services.

**Modulaires et évolutifs**, ils répondront aux différents besoins des collectivités et des entreprises désireuses de renouveler leur flotte avec des véhicules zéro émission. Bouygues Énergies & Services déploie également des groupes électrogènes à hydrogène PowiDian sur des sites isolés ou lors d'événements sportifs et culturels, en assurant la gestion de l'alimentation en hydrogène vert et les prestations de services.



Caroline MAZZOLENI, directrice Hydrogène et Smart Energies

## DES SOLUTIONS DE POINTE POUR DÉCARBONER L'INDUSTRIE

Bouygues Énergies & Services va prochainement bénéficier en France d'un contrat de distribution exclusive de l'offre **Power-to-Heat (P2H)**, une chaudière (boîtier) développée par la R&D de sa filiale Kraftanlagen Énergies & Services, en partenariat avec le fabricant norvégien Parat. Il s'agit d'une chaudière à électrodes convertissant l'électricité (y compris l'électricité issue des énergies renouvelables) en chaleur et/ou en vapeur pour alimenter les processus industriels de nos clients. Conçue pour produire de la chaleur et de la vapeur « **vertes** » afin de répondre aux enjeux de décarbonation de l'industrie, cette solution vise à remplacer les chaudières à gaz alimentées par des énergies fossiles.

« Nous envisageons de proposer les véhicules utilitaires développés par PowiDian Mobility et alimentés par de l'hydrogène renouvelable produit par Bouygues Énergies & Services dans le cadre de nos projets H2 s'articulant autour d'écosystèmes territoriaux. »

## KRAFTANLAGEN ACCÉLÈRE LA PRODUCTION DE GAZ RENEUVABLE

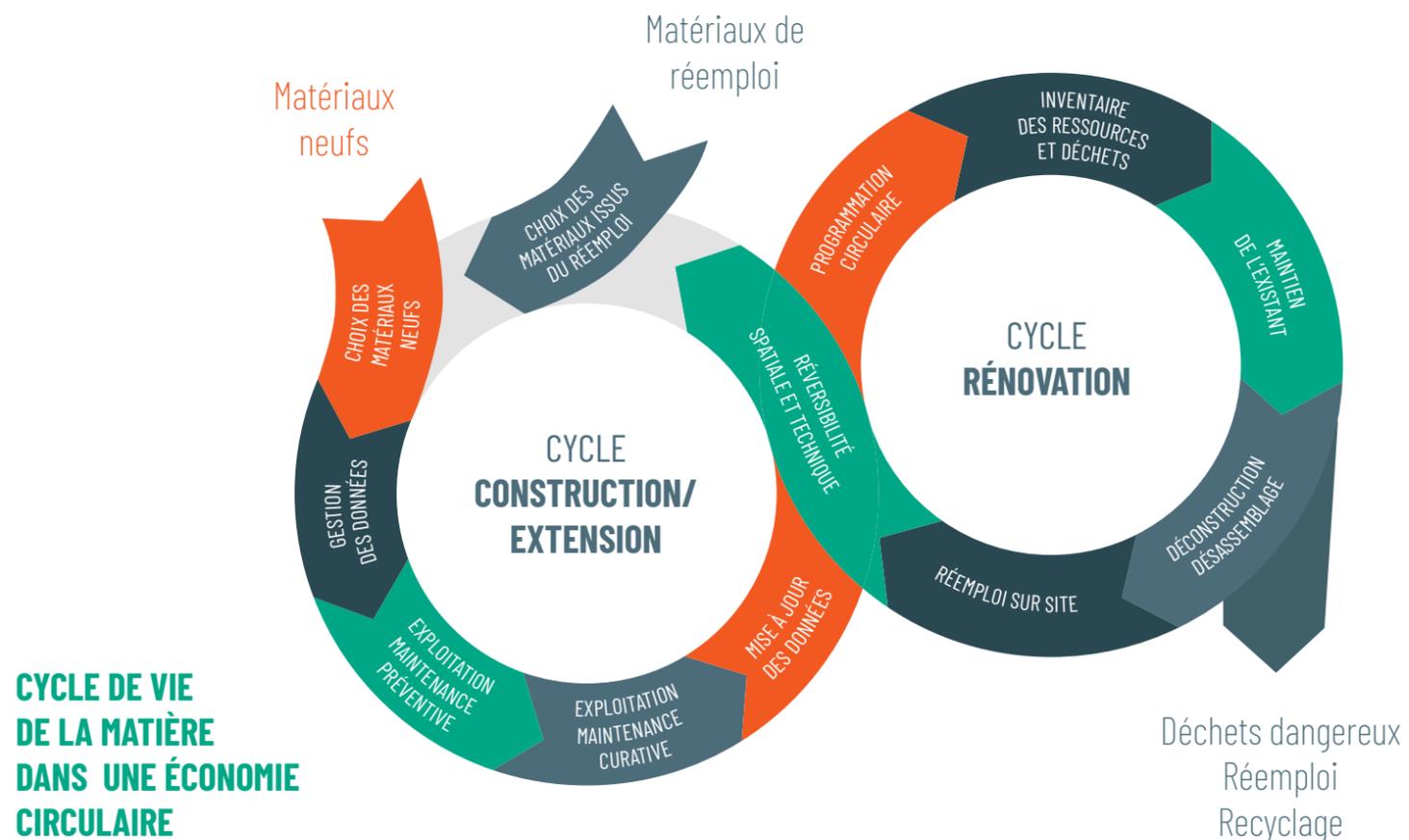
**Kraftanlagen, filiale de Bouygues Construction au sein du pôle Énergies & Services, aide ses clients à passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables grâce à des solutions de pointe comme Power-to-Gas (P2G).** Développée par la R&D avec l'entreprise allemande Electrochaea, cette technologie de biométhanisation permet de stocker de l'énergie renouvelable sous forme de méthane. Ce méthane, synthétisé par des bactéries à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène renouvelable, peut ensuite être injecté dans le réseau existant à la place du gaz naturel et être utilisé pour le transport, la production d'électricité ou les processus industriels. Kraftanlagen apporte aujourd'hui son expertise pour la conception et l'ingénierie d'une première usine commerciale de biométhanisation permettant d'accélérer le déploiement à grande échelle de la technologie P2G.

## BOUYGUES CONSTRUCTION DOTE SES CHANTIERS DE BASES VIE BAS-CARBONE

Élaborés par Bouygues Construction Matériel en partenariat avec Charm'Ossature, les nouveaux bungalows sont fabriqués à partir d'anciens bungalows recyclés et allient la **solidité et la modularité d'une ossature métallique à la performance thermique d'une enveloppe en bois**. Leur conception s'articule autour de quatre axes : une structure mixte faisant la part belle aux matériaux biosourcés, des sanitaires repensés pour en faire le cœur technique de la base vie, des équipements plus sobres et intelligents et un cloisonnement intérieur en bois chaleureux élégant. **En résultent un gain de confort pour les compagnons et une réduction de 30 à 40 % du bilan carbone par rapport aux bungalows standards.**



# CIRCULARITÉ



Romain BONNET,  
responsable de projets R&D éco-conception

## MESURER POUR MIEUX AGIR

Le secteur de la construction ne dispose pas encore d'indicateurs normalisés permettant d'évaluer la performance d'un ouvrage au regard de l'économie circulaire. Pour pallier cette lacune, la R&D de Bouygues Construction développe **un outil d'analyse des flux de matières dans ses projets de construction**.

Inspiré des travaux sur l'économie circulaire initiés par l'Association HQE-GCB, Cerqual, Certivéa, CSTB et Enea et basé sur la méthodologie Material Flow Analysis (MFA), il permettra de déterminer le taux de matériaux issus du recyclage, du réemploi ou de la filière biosourcée ainsi que leur recyclabilité.

« À terme, nous souhaitons pouvoir l'appliquer à tous nos chantiers afin de connaître et maîtriser notre empreinte matière. »

**ETH** zürich

## ETH Zurich : un nouveau partenariat académique autour de la construction circulaire

La R&D de Bouygues Construction définit les contours d'un nouveau partenariat avec l'**ETH de Zurich**. Il portera sur des sujets liés à l'économie circulaire, en particulier la réutilisation de matériaux et composants d'ouvrages (comme des poutres) grâce aux technologies numériques (modélisation 3D, intelligence artificielle, etc.). « L'ETH de Zurich est en pointe sur les sujets d'innovation dans la construction. En outre, la Suisse étant un territoire sur lequel le Groupe est bien implanté, cela a du sens de se tourner vers cette université », souligne Laure Ducoulombier, responsable du DesignLab. Parmi les problématiques explorées : comment déconstruire pour récupérer les matériaux, comment les qualifier et les inventorier et, demain, comment concevoir des bâtiments démontables ?



# /02

## ACCROÎTRE L'EFFICACITÉ OPÉRATIONNELLE

LA R&D FAIT PASSER LA CONSTRUCTION DANS LA QUATRIÈME DIMENSION.

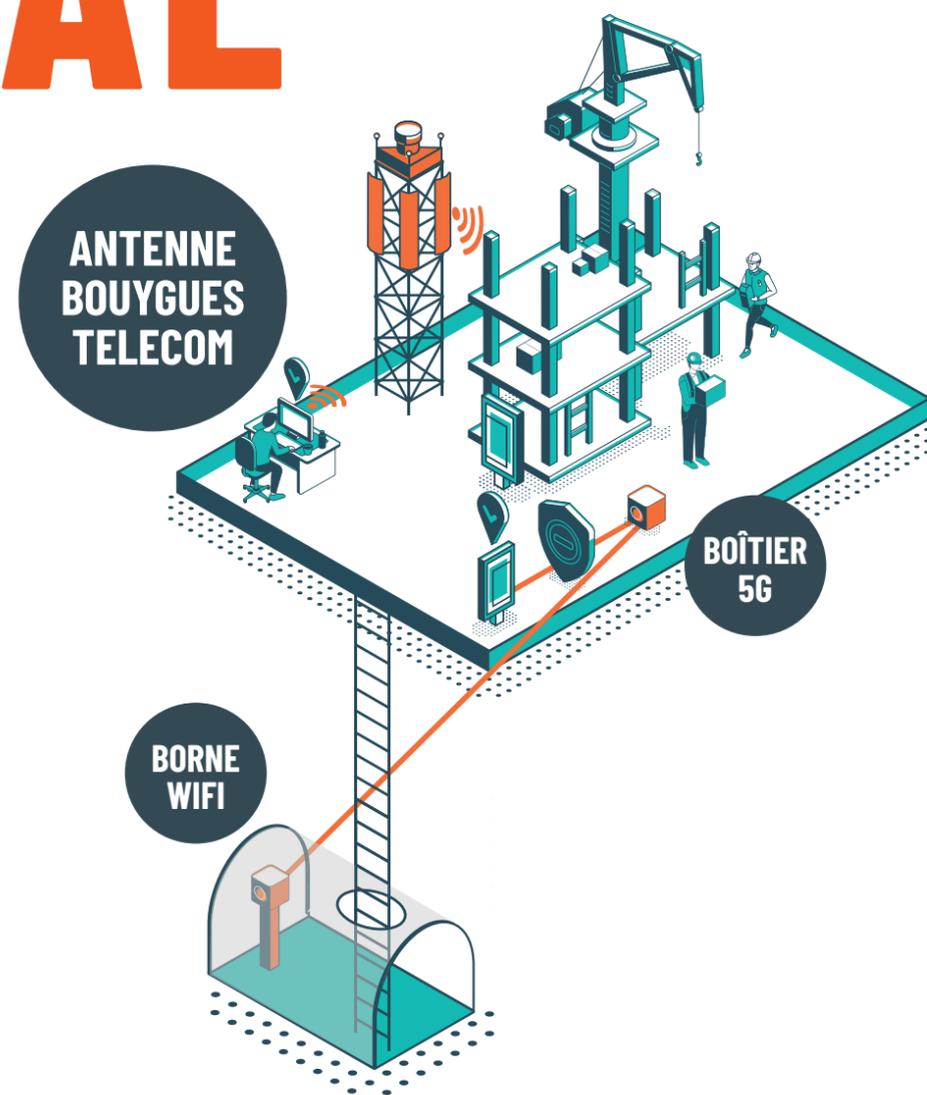
Au cœur du chantier 4.0, nos procédés s'industrialisent, intégrant de plus en plus la production hors site, l'impression 3D, la captation et l'analyse de données, l'automatisation et la robotisation. Sites, engins et compagnons sont connectés à toute la chaîne digitale de l'entreprise. Le jumeau numérique permet de « construire avant de construire » en explorant une variété de solutions dans l'espace et le temps ou en utilisant l'intelligence artificielle pour anticiper les pannes. La conception devient plus inclusive, paramétrique et multidisciplinaire.

# DIGITAL

## ALLIER NOS MÉTIERS POUR CONNECTER (TOUT) LE CHANTIER

Comment assurer une connectivité sur l'ensemble du chantier, même dans les sous-sols de nos ouvrages ? **Bouygues Construction** et **Bouygues Telecom** ont eu une idée : installer un routeur qui capte la 5G en surface et diffuse ce réseau très haut débit à une ou plusieurs bornes WiFi situées en sous-sol par le biais d'une connexion filaire Ethernet.

Ce dispositif opérationnel a été installé en quelques heures seulement sur les neuf niveaux souterrains du chantier de la gare Villejuif Institut Gustave-Roussy, dans le cadre du nouveau réseau Grand Paris Express. Il permet une continuité de services de télécommunications sur tout le chantier, même à 50 mètres de profondeur !



*Bouygues Construction, la révolution du bâtiment pour une construction durable.  
Interview de Frédéric GAL, directeur du projet de modernisation des métiers.*



## DU SUR-MESURE AVEC DES MÉTHODES INDUSTRIELLES

Comment industrialiser les chantiers – **pour construire mieux et plus rapidement** – tout en apportant des solutions sur-mesure, adaptées aux différents besoins des clients et maîtres d'œuvre ?

C'est l'équation complexe que tente de résoudre la R&D de Bouygues Construction qui mène, **en partenariat avec Dassault Systèmes, le projet PMNP** (Plateforme de Management Numérique des Projets). Écosystème digital intégré et collaboratif, la PMNP doit devenir l'outil de pilotage des projets pour l'ensemble des métiers du Groupe.

Elle permettra de standardiser et d'optimiser la qualité des processus de conception tout en permettant une grande variabilité des ouvrages, en facilitant notamment leur personnalisation grâce à un configurateur numérique.

## La construction entre dans une nouvelle dimension aux côtés de Dassault Systèmes

Bouygues Construction et Dassault Systèmes ont décidé de renforcer leur partenariat pour accélérer le développement de solutions numériques innovantes pour la construction. Elles sont basées sur l'expertise acquise par l'éditeur français de logiciels dans d'autres industries, telles que l'aéronautique ou l'automobile, et sur les savoir-faire de Bouygues Construction.

L'objectif est de fédérer l'ensemble des acteurs des projets de construction sur un environnement de données uniques (plateforme) qui comprendra notamment des modèles de lignes de produits, des outils de collaboration et des expériences de jumeau numérique. Ce jumeau numérique du projet permettra d'optimiser le cycle de vie de la construction pour accroître la productivité, la qualité, la santé-sécurité et la durabilité des chantiers.

## RÉDUIRE LES COÛTS ET LES DÉLAIS GRÂCE À L'OUTIL DE PLANIFICATION DE CHANTIER ALICE TECHNOLOGIES

Alice Technologies propose d'optimiser la planification des chantiers en phase d'appel d'offres et d'exécution pour réduire les coûts et les délais de construction. La plateforme a été développée par une start-up issue d'un projet de recherche à l'université de Stanford, avec laquelle Bouygues Construction collabore depuis ses débuts. Elle permet de créer et de mettre à jour de façon collaborative et paramétrique des plannings de construction en explorant une multitude d'options afin de trouver la meilleure approche. Pendant deux ans, le LabTP, dirigé par Nicolas BRAUD, a testé la solution afin de s'assurer qu'elle réponde aux besoins des chantiers d'infrastructure. Il a également piloté l'accompagnement au changement des équipes de Bouygues Travaux Publics qui travaillaient chacune avec d'autres outils de planification de projet. « **Sur le projet de ligne à grande vitesse HS2, le directeur du projet souhaitait que nous explorions différents scénarios afin de réduire les délais. Nous avons trouvé plusieurs solutions d'optimisation permettant un gain de temps significatif, ce qui l'a incité à**

**signer un contrat avec Alice Technologies pour le suivi de la phase d'exécution** », explique Nicolas BRAUD, directeur du LabTP. Alice Technologies permet de modéliser en 3D le projet de construction et les différents éléments de l'ouvrage, puis de définir les recettes ; les différentes tâches intervenant dans la réalisation de l'ouvrage et leur enchaînement logique pour passer d'un élément à l'autre. Il faut ensuite affecter les ressources : équipes, équipements, grues, matériaux, jalons et calendriers. Alice Technologies génère alors très rapidement des centaines de solutions potentielles intégrant les contraintes liées au projet. Pour chaque solution, l'outil crée automatiquement un planning 4D dont l'analyse permet de mesurer l'impact de différentes décisions sur le coût et la durée des travaux. Une fois le planning sélectionné, il peut être exporté dans un logiciel de gestion de projets comme Primavera P6. Pendant l'exécution du chantier, Alice Technologies permet de visualiser l'avancement des travaux et, en cas de retard, de réorganiser le planning et les ressources pour se remettre sur les rails.



Nicolas BRAUD, directeur du LabTP

## LA RÉALITÉ AUGMENTÉE POUR UN GUIDAGE EFFICACE DES INTERVENTIONS DE MAINTENANCE

En phase d'exploitation du bâtiment, l'affichage de la maquette BIM en réalité augmentée permet aux techniciens en charge de la maintenance de **visualiser l'intégralité de l'installation et de repérer les éléments invisibles à l'œil nu**, comme des vannes, sur lesquels ils doivent intervenir. Cette approche a été testée par Bouygues Énergies & Services et la R&D de Bouygues Construction à l'aide de lunettes de réalité augmentée et du logiciel

**NEXT-BIM** intégrant les maquettes des systèmes électriques, de chauffage et de plomberie. Le dispositif aide les techniciens à trouver des réseaux cachés derrière les plafonds et les murs et permet un gain de temps et d'efficacité important. **La solution est désormais opérationnelle** dans le bâtiment Francis Bouygues de l'École Centrale Supélec, véritable vitrine de la technologie BIM en exploitation.



## MIEUX SE PROJETER DANS UN PROJET DE CONSTRUCTION GRÂCE À LA RÉALITÉ VIRTUELLE

L'équipe du pôle R&D **DesignLab** développe un système de réalité virtuelle multi-participants, permettant une immersion dans un projet de construction. L'idée est de « téléporter » les utilisateurs dans une maquette 3D d'ouvrage dans laquelle ils peuvent se déplacer et interagir à plusieurs simultanément. Explorer le futur ouvrage, accéder aux données du modèle, commenter et valider des choix de conception... Cet espace virtuel partagé améliore la compréhension et l'échange autour d'un projet de construction et permet à toutes les parties prenantes (architectes, équipes travaux, promoteurs et clients) de mieux se projeter dans le produit final. Le dispositif, baptisé **VISIR**, est actuellement en démonstration au showroom du DesignLab à Challenger, siège social de Bouygues Construction.

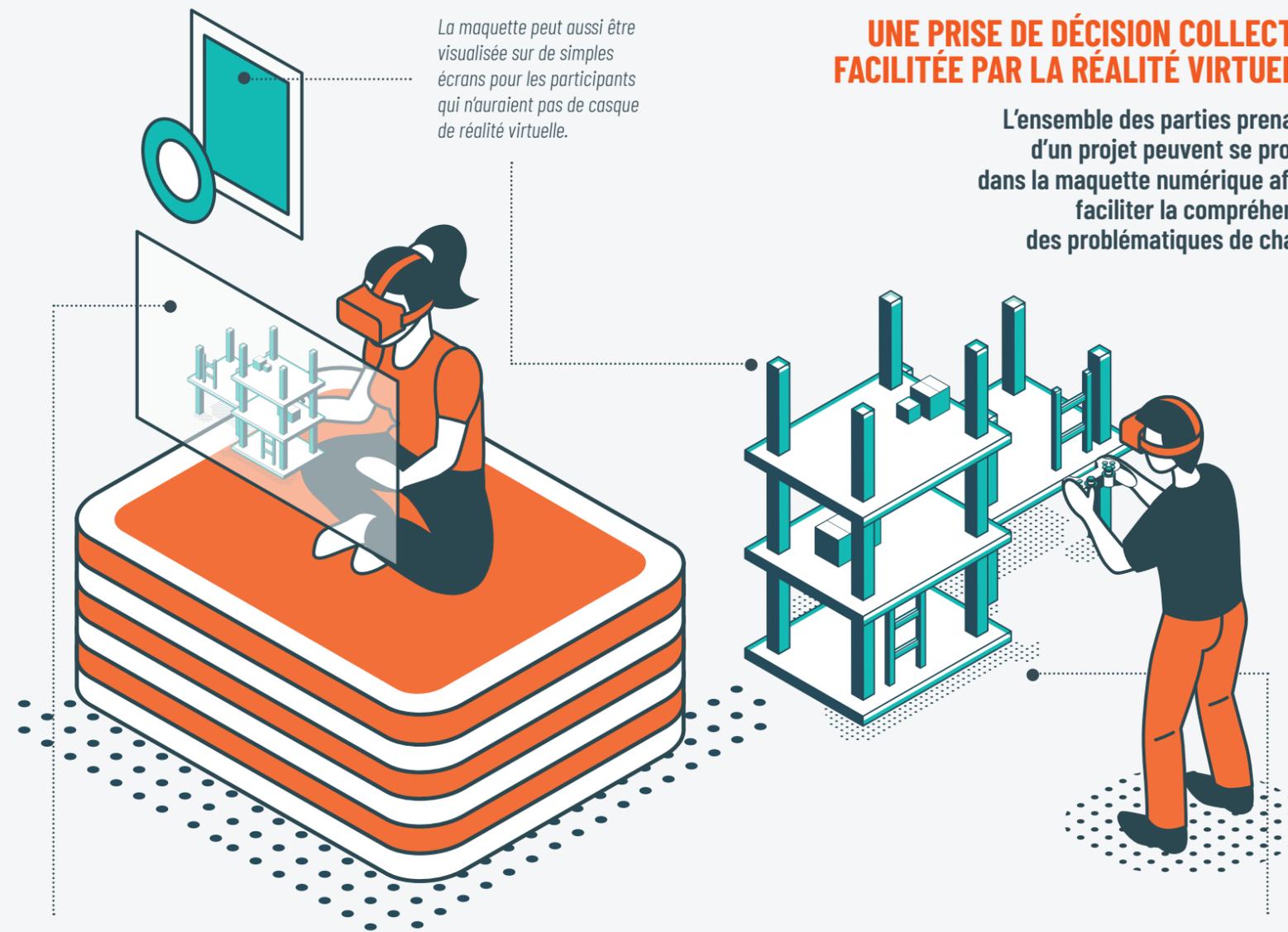
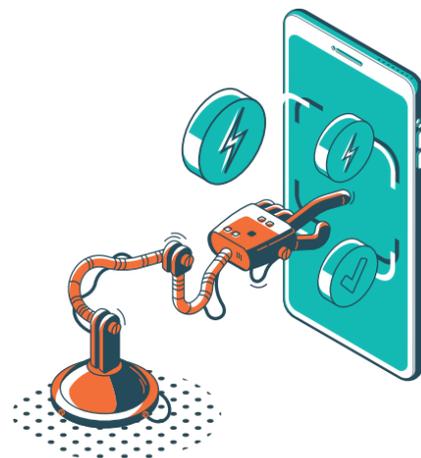


## LES FORMATEURS EN HABILITATION ÉLECTRIQUE DISPOSENT D'UN NOUVEL OUTIL À LEUR ARSENAL

Tous les trois ans, les collaborateurs d'une entreprise œuvrant dans le secteur électrique doivent suivre une formation obligatoire sanctionnant leur aptitude à effectuer des tâches (comme la consignation électrique) en toute sécurité. Jérôme PALANCA, technicien d'études confirmé, a eu l'idée de remplacer les supports théoriques traditionnels par un module en réalité virtuelle. Rejoint par Karthik MOURELIDAR, responsable Innovation chez Bouygues Énergies & Services, il a puisé dans son expérience d'électricien pour développer les paramètres de l'outil sur-mesure. Fonctionnant avec un casque grand public et des manettes, **il immerge l'utilisateur dans une simulation interactive et lui permet de manipuler des équipements sans danger**. Intégré au kit formateur en habilitation électrique depuis novembre 2021, il s'adapte à différents publics et situations et améliore significativement la mémorisation des bons gestes à réaliser.

## AUTOMATISER LES TÂCHES RÉPÉTITIVES POUR SE CONCENTRER SUR UNE CONCEPTION À HAUTE VALEUR AJOUTÉE

Plan Group, filiale de Bouygues Énergies & Services, a lancé un projet R&D visant à améliorer l'efficacité de son ingénierie en utilisant des outils de conception virtuelle. Piloté par son bureau d'étude de Toronto (Canada) et avec l'appui du pôle R&D DesignLab, **il vise à minimiser les tâches répétitives et chronophages en développant un add-in Revit** (logiciel de conception de bâtiment édité par Autodesk) qui réalise de manière automatique et intelligente la répartition et la mise en œuvre des systèmes électriques, courants forts et courants faibles. Cette solution permettra d'améliorer les performances opérationnelles de son ingénierie, mais aussi la qualité des livrables, en réduisant les risques d'erreurs.



La maquette peut aussi être visualisée sur de simples écrans pour les participants qui n'auraient pas de casque de réalité virtuelle.

## UNE PRISE DE DÉCISION COLLECTIVE FACILITÉE PAR LA RÉALITÉ VIRTUELLE.

L'ensemble des parties prenantes d'un projet peuvent se projeter dans la maquette numérique afin de faciliter la compréhension des problématiques de chacun.

Les participants sont immergés au sein de la même maquette et peuvent échanger en temps réel dans l'environnement virtuel et ce même à distance.

Grâce à l'outil VISIR et à un casque de réalité virtuelle, les participants peuvent visualiser la maquette comme s'ils étaient dans l'ouvrage qui va être construit.

## DES CHOIX DE CONCEPTION ÉCLAIRÉS POUR PROPOSER LE MEILLEUR COMPROMIS COÛT-CARBONE

La méthode **MDO (conception paramétrique multidisciplinaire)** assemble les différents outils métiers impliqués dans la conception d'un ouvrage dans un processus automatisé. Adaptée à un projet, elle permet d'évaluer les performances ainsi que le coût et le bilan carbone de centaines de variations de conception en combinant plusieurs paramètres.

« Grâce à MDO, nous pouvons explorer trois fois plus de solutions constructives en deux fois moins de temps et les comparer sur une base **quantifiée** », explique Sylvain GERY, responsable de projets R&D. Il est alors possible de proposer au client plusieurs solutions optimales en amont de la conception. Cette approche a été appliquée à plusieurs composants d'ouvrage, tels que le plancher ou les parois moulées.

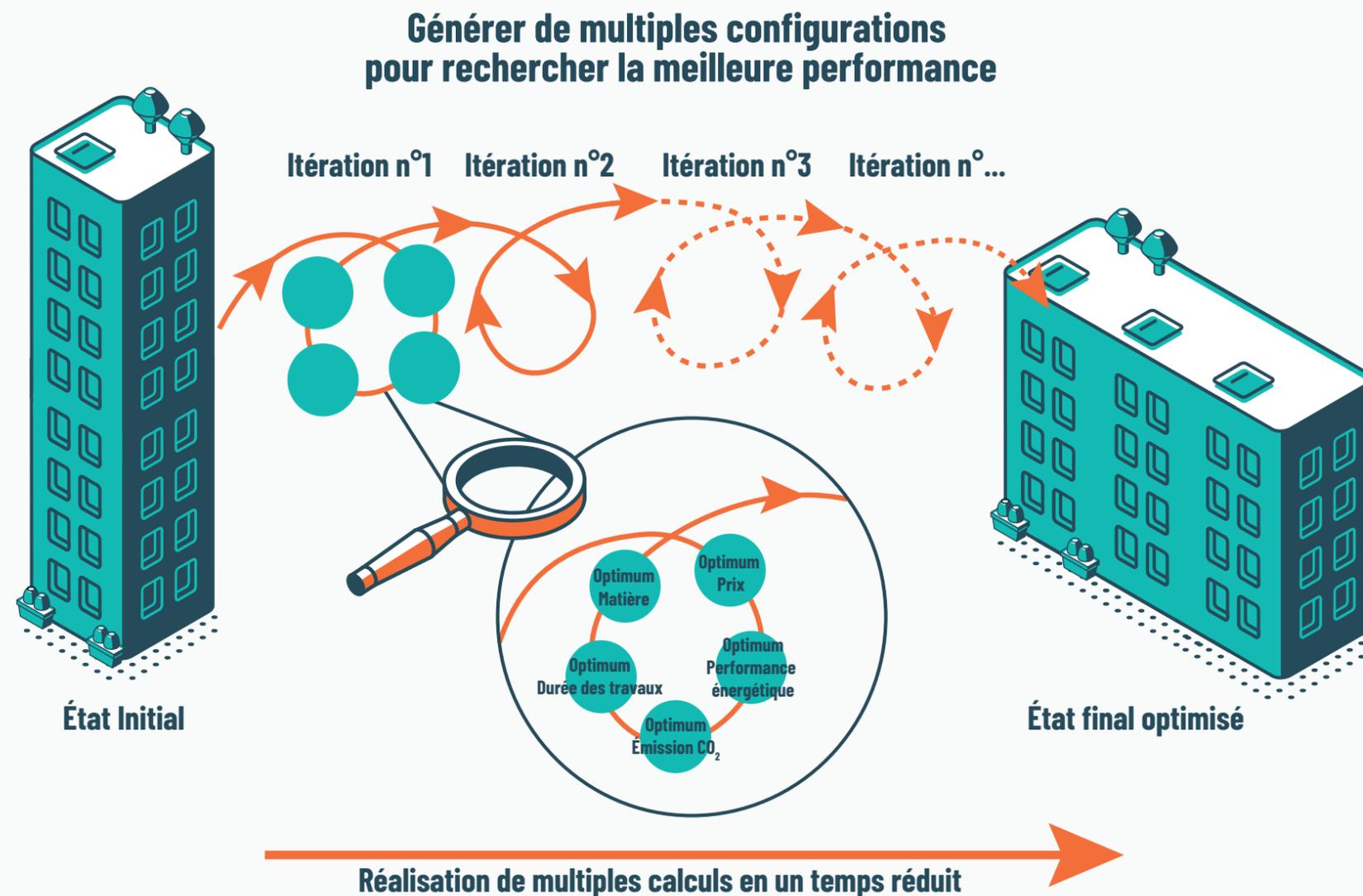
## UNE APPROCHE HOLISTIQUE DE LA CONCEPTION DES OUVRAGES

Là où d'autres recherches complémentaires menées au sein du Groupe s'intéressent à optimiser des composants d'ouvrages, les travaux menés par Lou SACCHETTINI, responsable de projets R&D, dans le cadre de sa thèse au sein du CIFE cherchent à appliquer le **MDO** à l'échelle d'un bâtiment entier.

Pour limiter le nombre important de variables, le champ d'étude a été réduit à des types de construction industrialisés, où beaucoup d'éléments sont standardisés. **Ces méthodologies doivent permettre d'associer l'ensemble des variables et des contraintes que les architectes et les ingénieurs doivent habituellement prendre en compte** lors du processus de conception, dans le but d'optimiser la performance des bâtiments.

« Notre vision, à terme, est de pouvoir utiliser de nouvelles techniques permettant de développer des systèmes de construction industrialisée beaucoup plus flexibles et offrant une plus grande liberté de conception architecturale. »

Lou SACCHETTINI, responsable de projets R&D



## AUTOMATISER LE SCAN TO BIM POUR CRÉER DES MODÈLES PLUS PRÉCIS

Le **Scan to BIM** consiste à convertir les données d'un ouvrage existant acquises sous forme de nuage de points en modèle 3D. Ce processus, presque entièrement manuel, est essentiel lors de la création ou de la mise à jour d'un Building Information Model (BIM). Il permet de résoudre plusieurs problèmes courants, tels que le manque d'informations fiables sur d'anciens bâtiments ou l'écart, quasi inévitable, entre un modèle « tel que conçu » et l'ouvrage « tel que construit ». Au Royaume-Uni, Bouygues Énergies & Services veut automatiser le Scan to BIM pour gagner du temps et de la précision. En effet, la modélisation de certains éléments de construction, comme des murs ou des fenêtres, peut être générée automatiquement à l'aide d'outils algorithmiques. Certains add-ins de la collection Architecture, Engineering & Construction d'Autodesk (Dynamo, Rhino) ou des plug-ins Leica CloudWorx possèdent des fonctionnalités de reconnaissance automatique. L'intérêt de cette automatisation partielle est de réduire le temps passé sur la modélisation d'éléments génériques. Les équipes peuvent se consacrer à des tâches à plus haute valeur ajoutée (entrer dans le détail des matériaux, par exemple) afin de créer des modèles d'ouvrage plus fidèles et précis. Cette approche a été testée dans le cadre d'un projet pilote au centre hospitalier Addenbrookes Hospital, dont Bouygues Énergies & Services a numérisé l'ensemble des archives contenant divers documents originaux (plans, contrats de service, historique des travaux et des activités de maintenance, etc.). L'expérimentation, riche en enseignements en matière d'extraction de connaissances, a révélé l'importance du Scan to BIM, qui permet d'accéder à des informations précises sur la géométrie de l'actif, de ses composants et équipements. Ces informations sont essentielles pour guider la prise de décision en matière de modélisation et, plus tard, d'exploitation et de maintenance. L'équipe à l'origine de ce projet R&D documente la démarche en détail pour permettre à d'autres entités de Bouygues Énergies & Services de la répliquer.

### CONNECTEZ-VOUS AU DESIGNLAB !



Le showroom du DesignLab, propose des solutions numériques innovantes pour la construction (réalité virtuelle et augmentée, jumeau numérique, optimisation de conception, Scan 3D...).



## VERS UNE STRATÉGIE COMMUNE ET COHÉRENTE POUR LE JUMEAU NUMÉRIQUE\*

Une approche structurée au niveau de l'entreprise. *« Les initiatives se multiplient au sein de Bouygues Construction. La R&D pilote actuellement un projet visant à définir une vision commune et à construire une démarche coordonnée et cohérente autour du jumeau numérique, permettant de créer de la valeur pour nos équipes et nos clients »*, explique Laure DUCOULOMBIER, responsable du pôle R&D DesignLab.

Dans cette optique, le cabinet de conseil Niji, spécialisé dans la transformation numérique des entreprises, a réalisé une étude approfondie sur le jumeau numérique. L'objectif était double : établir une définition du jumeau numérique appliqué au secteur de la construction, partagée par tous les métiers de Bouygues Construction et initier une réflexion sur le positionnement du Groupe au sein de ce marché émergent.

Ces travaux ont abouti à la création d'une matrice de décision, comportant neuf types de jumeaux numériques auxquels sont associés une trentaine de cas d'usages. Ils sont répartis en fonction de la phase du cycle de vie d'un projet (conception, construction, exploitation-maintenance) et du type d'objet (processus, ouvrage, environnement) sur lesquels porte la mise en miroir. Par exemple, dans la visualisation d'un bâtiment tel que construit, la copie numérique concerne un ouvrage en phase d'exploitation.

Dès lors, comment se positionner ? *« Deux stratégies sont possibles : la mise en œuvre de jumeaux numériques à usage interne, permettant d'optimiser nos processus métiers et d'accroître la performance des ouvrages, et/ou la construction d'une offre commerciale de jumeau numérique destinée à nos clients »*, décrit Laure DUCOULOMBIER.

Cette offre pourrait prendre différentes formes : la fourniture de données aux acteurs de la chaîne de valeur, l'exploitation et l'enrichissement de jumeaux numériques existants, ou le développement d'une solution propre. *« Nous irons de toute façon vers le premier scénario. Puis, nous devons établir une feuille de route stratégique et identifier les cas d'utilisation prioritaires pour aller plus loin. »* Quelle que soit l'orientation retenue, Bouygues Construction possède un atout majeur : son expertise en matière de données.



Laure DUCOULOMBIER, responsable du pôle R&D DesignLab

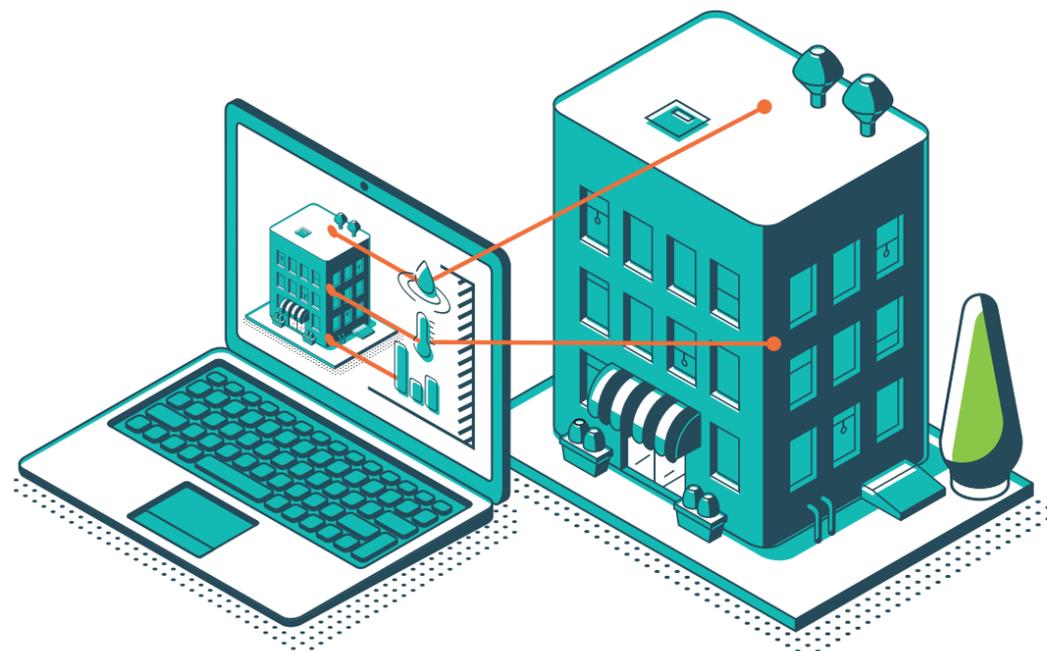
*« La maîtrise de la donnée est l'un des fondements du jumeau numérique. Nous sommes, par exemple, les seuls au sein de la chaîne de valeur en mesure de fournir les données exactes des ouvrages tels que construits que nous réalisons. »*

### \*Le jumeau numérique

Un jumeau numérique permet de coupler en temps réel et de manière dynamique l'état d'un actif physique ou d'un processus avec une représentation virtuelle fonctionnelle. Il reflète les évolutions et les performances actuelles, renvoie aux événements passés et à l'intention de conception et projette vers les événements futurs du cycle de vie.

## UN AVATAR VIVANT DU CHANTIER D'INFRASTRUCTURE

Dans le cadre de la Chaire de recherche *« Jumeaux numériques de la construction et des infrastructures dans leur environnement »* lancée par l'ESTP avec ses partenaires industriels, Bouygues Travaux Publics va piloter, à partir d'octobre 2022, une thèse sur le jumeau numérique d'un chantier d'infrastructure pendant toute la phase de réalisation de l'ouvrage. Ce travail s'inscrit dans une série de thèses adressant les axes de recherche et d'études de la chaire : **structuration de données, continuité numérique, architecture des jumeaux numériques, gouvernance, etc.** Il doit permettre d'apporter de nouvelles méthodologies d'exécution de chantier et outils d'aide à la décision pour la direction de projet et contribuer à la création d'un dossier des ouvrages exécutés (DOE) numérique. Un premier jumeau numérique sera conçu comme une réplique dynamique d'un plan d'installation de chantier (PIC) ; un système vivant, alimenté par les données remontées par les compagnons et les chefs d'équipe et évoluant en fonction de l'avancement des travaux.



## Une alliance inédite autour du jumeau numérique avec l'ESTP

L'ESTP a lancé la Chaire de recherche *« Jumeaux numériques de la construction et des infrastructures »* avec Bouygues Construction, Egis, SNCF Réseau, Schneider Electric, le BRGM et l'ENSAM. L'objectif est de créer une vision commune et de lever les verrous technologiques pour le développement de cette technologie conçue comme une plateforme de services efficaces et durables.

*« L'intérêt de cette alliance est qu'elle rassemble des experts académiques et des acteurs de toute la chaîne de valeur autour de ce sujet très transversal, intervenant tout au long du cycle de vie des ouvrages »*, explique Laure Ducoulombier, responsable du DesignLab. Chaque partenaire industriel a défini une problématique qui fera l'objet d'une thèse menée à l'ESTP. Bouygues Construction a choisi d'explorer le jumeau numérique de chantier d'infrastructure.

# OPÉRATEUR CHANTIER

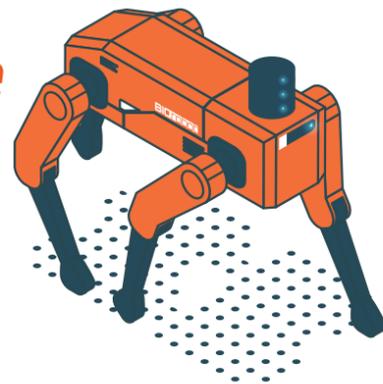
## LE CONSTRUCTION LAB IMAGINE LES CHANTIERS DE DEMAIN

Lancé en 2021 en partenariat avec Bouygues Construction Matériel, le Construction Lab a pour mission d'accélérer les projets de R&D à fort potentiel pour les chantiers de demain. Des chantiers qui vont vers plus d'industrialisation, de robotisation et de digitalisation au service de la qualité, de la productivité, de la santé-sécurité et en visant toujours à réduire les émissions carbone. Cela passe par l'introduction d'innovations de rupture développées en lien étroit avec les équipes chantier.



« La R&D ne peut pas opérer en vase clos. Au contraire, elle doit travailler avec les équipes pour faire émerger des solutions en partant des besoins des opérateurs et les enrichir grâce aux retours du terrain. »

Damien BAHON, responsable R&D du Construction Lab



« L'opérateur connecté » est le premier système de communication digital pensé pour les opérationnels de chantier.

## PROPOSER UN OUTIL ROBUSTE DE COMMUNICATION, « TOUT EN UN » À NOTRE COMPAGNON DE CHANTIER

« L'opérateur connecté est un système de communication qui révolutionne la transmission d'informations sur les chantiers », peut-on lire sur un site dédié à la solution publiée par Bouygues Construction pour un test de marché. L'ambition est de dépasser le talkie-walkie traditionnel – encore massivement utilisé sur les chantiers – pour aller vers un équipement tout-en-un, disponible sur tous les chantiers.

La digitalisation des chantiers doit encore répondre à des enjeux importants.

« Le premier est de connecter la production au pilotage de chantier pour réduire la non-qualité », explique Damien BAHON, responsable R&D du Construction Lab.

« Aujourd'hui, les opérateurs de production ne sont ni connectés, ni digitalisés. »

Le deuxième enjeu est de collecter des données fiables pour mieux suivre la production et optimiser les processus. C'est pour relever ces défis que le Construction Lab a lancé le projet « Opérateur connecté ».

En 2021, l'équipe transverse réalise des enquêtes de terrain sur une trentaine de chantiers qui lui permettent de dessiner le profil de l'opérateur du futur :

« En premier lieu, il communique ; ensuite, il collecte de la donnée au service de sa tâche, de son chantier et de son entreprise », décrit Damien BAHON. Pour ce faire, il a besoin d'accessoires adaptés à l'environnement de chantier et d'applications mobiles faciles à utiliser.

En partant de ce concept, la R&D de Bouygues Construction collabore avec l'agence d'industrialisation de produits hightech Kickmaker. Ensemble, elles mettent au point un boîtier robuste doté de boutons physiques permettant aux compagnons de naviguer sur un smartphone standard dans des conditions de chantier. En parallèle, un portail d'applications est conçu pour accéder à toutes les fonctionnalités de communication (talkie-walkie, téléphone et visio) et de collecte de données (prises de photos/vidéos, partage de données, accès aux tâches de la journée) depuis une interface unique et épurée.

À titre expérimental, une connexion à la Plateforme de Management Numérique de Projet a pu être mise en place depuis l'application portail. Cela permet aux opérateurs de terrain d'accéder aux tâches éditées depuis la plateforme, de renseigner leur avancement et même de charger des photos prises sur le terrain avec le prototype. Ouvrant ainsi la voie à l'enrichissement des objets de la maquette numérique.

Le projet Opérateur connecté est aujourd'hui en phase de prototypage. L'équipe de Damien BAHON affine le design, l'ergonomie et les matériaux du boîtier et continue de développer l'application. À partir de septembre 2022, après une première apparition en juin au salon VivaTech, à Paris, une vingtaine de prototypes fonctionnels seront mis entre les mains des compagnons sur plusieurs chantiers du Groupe pour les premiers tests terrain. Une nouvelle étape vers le système de communication du futur, taillé pour les besoins du chantier 4.0 !



## Améliorer le métier de grutier

Sur une aire de préfabrication du chantier Quai 22 de Bouygues Bâtiment Nord-Est à Lille, des grutiers sont invités à s'installer sur le Crane POD, un poste de conduite de grue d'un genre nouveau, déporté au sol. « **Le projet intrigue et attise la curiosité des grutiers, mais aussi des équipes travaux et des organismes de sécurité** », raconte Delphine BASQUIN, responsable de projets Bouygues Construction Matériel.

« **Les grutiers ont montré une certaine aisance ; ils sont parvenus à s'approprier l'outil et nous ont transmis des retours enthousiasmants** ».

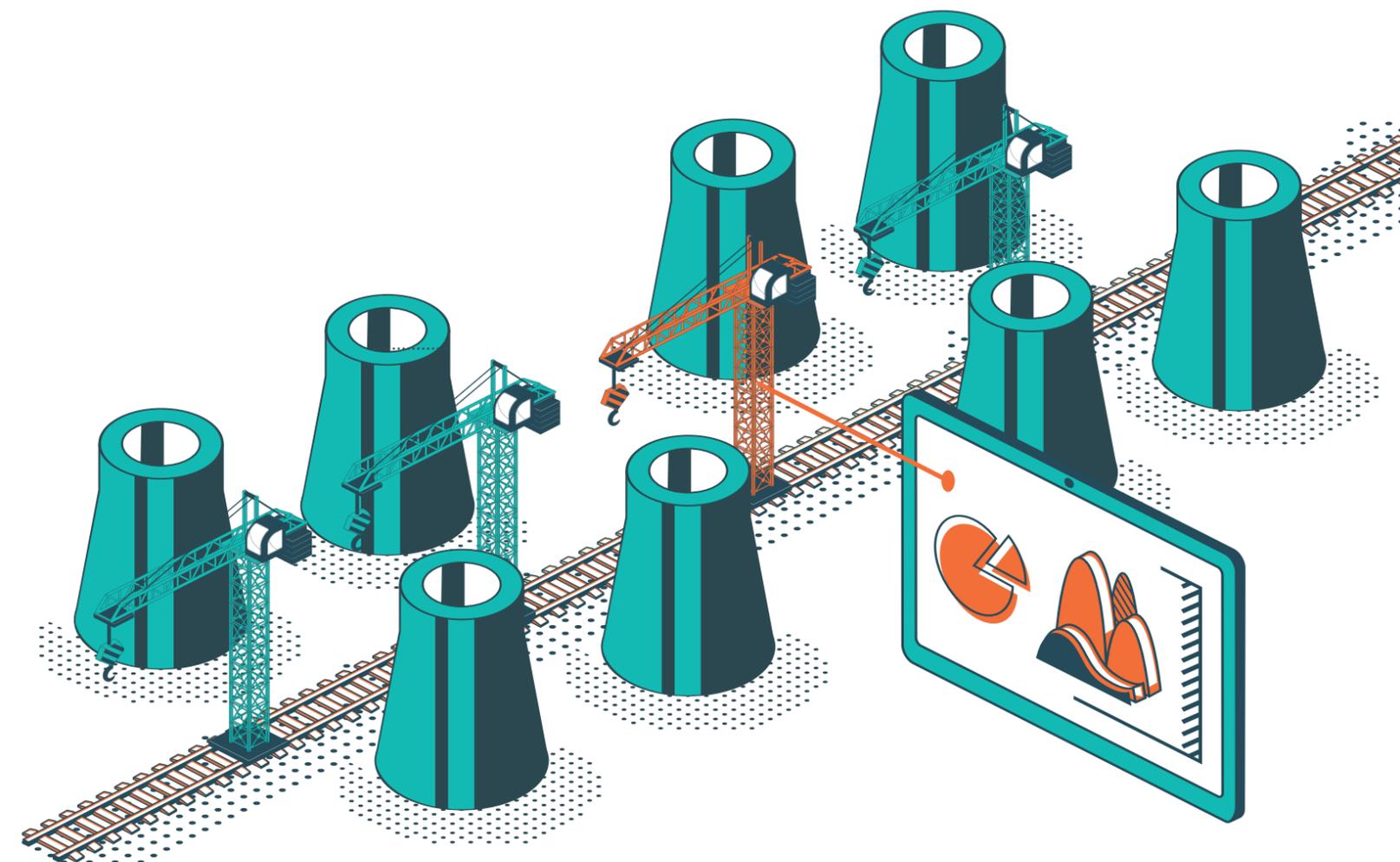
La grue augmentée est l'un des projets phares du pôle R&D Construction Lab, pensé pour et avec les grutiers afin d'améliorer l'ergonomie de leur poste de travail ainsi que la sécurité des chantiers. Ce programme de recherche ambitieux comprend également une tablette intégrant les informations essentielles au pilotage, enrichies grâce à la réalité augmentée.



## COCKPIT DE CHANTIER : VERS UNE AUTOMATISATION DU REPORTING

Quelles données de chantier sont véritablement utiles ? Comment les collecter, les exploiter et les mettre à disposition des équipes opérationnelles pour suivre et optimiser l'exécution des travaux ?

Ce sont les questions auxquelles tente de répondre le DataLab. Avec le projet Cockpit de chantier mené avec la Chaire Construction 4.0 et le Construction Lab, la cellule chargée de la valorisation des données de Bouygues Construction s'attaque au reporting. **Les travaux portent sur la définition d'indicateurs pertinents et sur le développement de solutions techniques pour automatiser cette action essentielle mais fastidieuse.** Par exemple, en exploitant les données issues des data loggers placés sur les grues pour enregistrer leurs données d'activité.



## IA DÉCOUPAGE ET CLASSIFICATION DE MOUVEMENTS DE GRUE POUR ACCOMPAGNER LE SUIVI DE NOS CHANTIERS

Les dizaines de grues connectées qui s'activent sur les immenses chantiers de l'EPR Hinkley Point C, au sud-ouest de l'Angleterre et du parc éolien en mer de Fécamp, en Normandie, collectent d'importantes quantités de données (hauteur du crochet, courbes de charge, etc.).

Une source d'information fiable sur le fonctionnement des grues que le LabTP récupère et met à disposition des équipes chantier. Mais il ne s'arrête pas là. Il développe également des algorithmes d'apprentissage pour découper et classifier les mouvements des grues, c'est-à-dire reconnaître automatiquement leur nombre et leur nature. Cela apporte une meilleure visibilité sur le déroulement du chantier et la saturation réelle des grues, afin d'optimiser leur utilisation et de réduire les coûts de location.

# INDUSTRIALISATION

## SMARTFABRIK : CRÉER LES CONDITIONS DE LA RÉPÉTITIVITÉ

Le projet SmartFabrik a pour objectif de transformer notre mode de production des ouvrages en utilisant les process de l'industrialisation. Cela se traduit notamment par le développement, en phase de conception, de sous-ensembles, c'est-à-dire des parties de bâtiments, configurables en fonction des besoins exprimés (contraintes client, emprise au sol, règles d'urbanisme particulières), adaptables, mais suffisamment répétables pour pouvoir améliorer la productivité et la qualité. C'est une méthode qui associe tous les corps d'états, les architectes, les bureaux d'études et les équipes de production. Ce formidable travail d'industrialisation s'appuie aussi sur la Plateforme de Management Numérique des Projets, « *un véritable accélérateur de notre démarche qui permet d'agréger toutes les informations sur ces sous-ensembles et de les configurer simplement pour maîtriser la variabilité de la configuration générale* », indique Julien FLÉCHARD, responsable de ce projet de recherche. **Son objectif ? Développer 25 sous-ensembles opérationnels en 2022 !**

## CAPTER DES DONNÉES DE CHANTIER, DE MANIÈRE AUTOMATIQUE ET AUTONOME : DÉFI LANCÉ !

Au quotidien, nous utilisons de plus en plus d'outils numériques mais sur le chantier, ce n'est pas si simple. Toutes les équipes chantiers, quel que soit le projet, doivent réaliser des relevés pour valider l'avancement ou la bonne exécution des travaux. Aujourd'hui, elles procèdent par des visites sur le terrain, très chronophages. Le projet de recherche co-piloté par le ConstructionLab et la Chaire Construction 4.0 vise à permettre de collecter des données (mesures, ouvrages exécutés, non conformités, etc.) à l'aide de robots mobiles se déplaçant de façon autonome sur le terrain. Cette captation automatisée pourra permettre de réaliser à moindre coût des mises à jour des maquettes BIM ou de proposer à nos clients des visites virtuelles de leurs bâtiments en construction ou en phase de finition.



## Faire avancer la construction industrialisée avec l'Université de Stanford

Bouygues Construction est membre du CIFE ( Center for Integrated Facility Engineering ) depuis plusieurs années. Ce département de recherche de l'Université de Stanford développe et teste des méthodes d'ingénierie et de gestion pour améliorer la conception, la construction et l'exploitation de l'environnement bâti, du bâtiment à la ville tout entière.

Dans le cadre de sa thèse au sein du CIFE, Lou SACHETTINI, responsable de projets R&D, mène une recherche sur un modèle permettant aux équipes de conception d'évaluer la compatibilité d'éléments de construction préfabriqués avec le projet. L'objectif est de faciliter l'industrialisation de la construction dès la phase de conception des plans architecturaux.



## L'IMPRESSIION 3D DE BOÎTES DE RÉSERVATION, UNE NOUVELLE BRIQUE DU CHANTIER 4.0

L'entreprise mène actuellement une première preuve de concept (POC) sur l'impression 3D de boîtes de réservation. Ces boîtes sont fabriquées dans une usine par un robot en impression 3D, puis livrées sur site. Elles sont ensuite intégrées par les compagnons dans les banches avant coulage du béton. Mais contrairement aux boîtes classiques, habituellement réalisées en bois ou en aluminium, elles ne nécessitent pas d'action de décoffrage. C'est ce que l'on appelle un coffrage perdu. Ce procédé présente plusieurs avantages. D'abord, **il diminue l'empreinte carbone des chantiers en évitant la production de déchets liés à l'utilisation de boîtes jetables** et en limitant au maximum le besoin de matière (l'impression 3D permettant de déposer la juste quantité de matière). Ensuite, **il constitue un gain de temps car il supprime l'opération chronophage, le décoffrage**. Par ailleurs, l'impression 3D pourrait permettre de réaliser des jonctions complexes à moindre frais, plus rapidement en proposant une fabrication, à la demande, de pièces sur-mesure. Cette fabrication en usine, à partir d'un relevé 3D sur le site, pourra réduire le risque de potentielles erreurs.

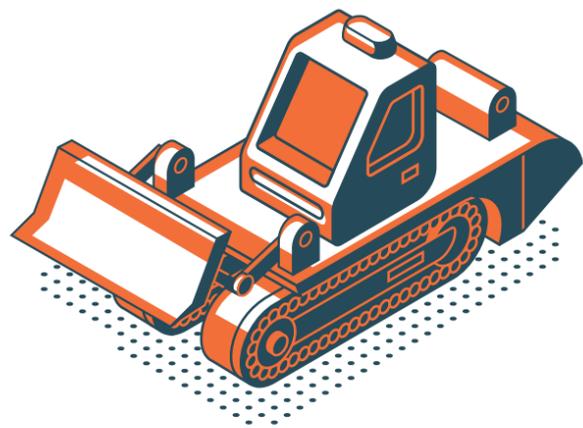
Baptiste BURNIER-FRAMBORET, responsable de projets R&D Bouygues Construction, a testé quatre modèles de réservations. Elles sont imprimées par la société XtreeE – sélectionnée pour son expertise reconnue dans le domaine des technologies d'impression 3D béton pour la construction – sur le chantier Bouygues Bâtiment France du nouveau collège d'Ivry-sur-Seine. À ce stade, il faut rendre la solution plus robuste **en vue d'un déploiement à grande échelle et une intégration à la PMNP** (Plateforme de Management Numérique des Projets). Demain, chaque conducteur de travaux pourra déclencher simplement sa commande de boîtes de réservation en communiquant les codes de fabrication issus de la maquette 3D et être livré très rapidement sur le chantier.

« L'impression 3D révolutionne le chantier 4.0 en apportant l'une des briques manquantes de la digitalisation de la chaîne de valeur de Bouygues Construction. **Elle permet de maintenir une continuité numérique, depuis la conception et la commande d'éléments de construction jusqu'à leur livraison sur les chantiers**, et ce, grâce à une fabrication robotisée et un suivi digitalisé de bout en bout », souligne Baptiste BURNIER-FRAMBORET.

*« L'impression 3D est encore au stade expérimental dans le secteur de la construction. En testant de nouvelles solutions sur ses chantiers, Bouygues Construction s'approprie cette technologie et contribue à l'améliorer. Le Groupe veut également participer à la certification de ce nouveau mode constructif pour accélérer son adoption. »*

*Baptiste BURNIER-FRAMBORET, responsable de projets R&D*





## SUIVI TEMPS RÉELS DES ENGS, DES GRUES ET DES TUNNELIERS AFIN DE MAXIMISER LEUR UTILISATION ET OPTIMISER LEUR NOMBRE SUR CHANTIERS

Le Data lake de Bouygues Travaux Publics stocke des dizaines de sources de données brutes, collectées sur ses chantiers d'infrastructures. Cela inclut les données des engins et des machines, comme les tunneliers qui informent de manière objective de leur état de fonctionnement et leur activité.

« Le LabTP met en place des outils pour récupérer ces données et les rendre accessibles aux équipes chantier à l'aide de tableaux de bord réalisés sur-mesure pour les différents matériels. Nous les accompagnons ensuite dans l'interprétation de ces données », explique Nicolas BRAUD, directeur du LabTP.

Un apport précieux car cette analyse de données permet de suivre le chantier en temps réel, de mieux comprendre l'utilisation quotidienne des engins et de prendre de meilleures décisions pour améliorer l'efficacité opérationnelle.

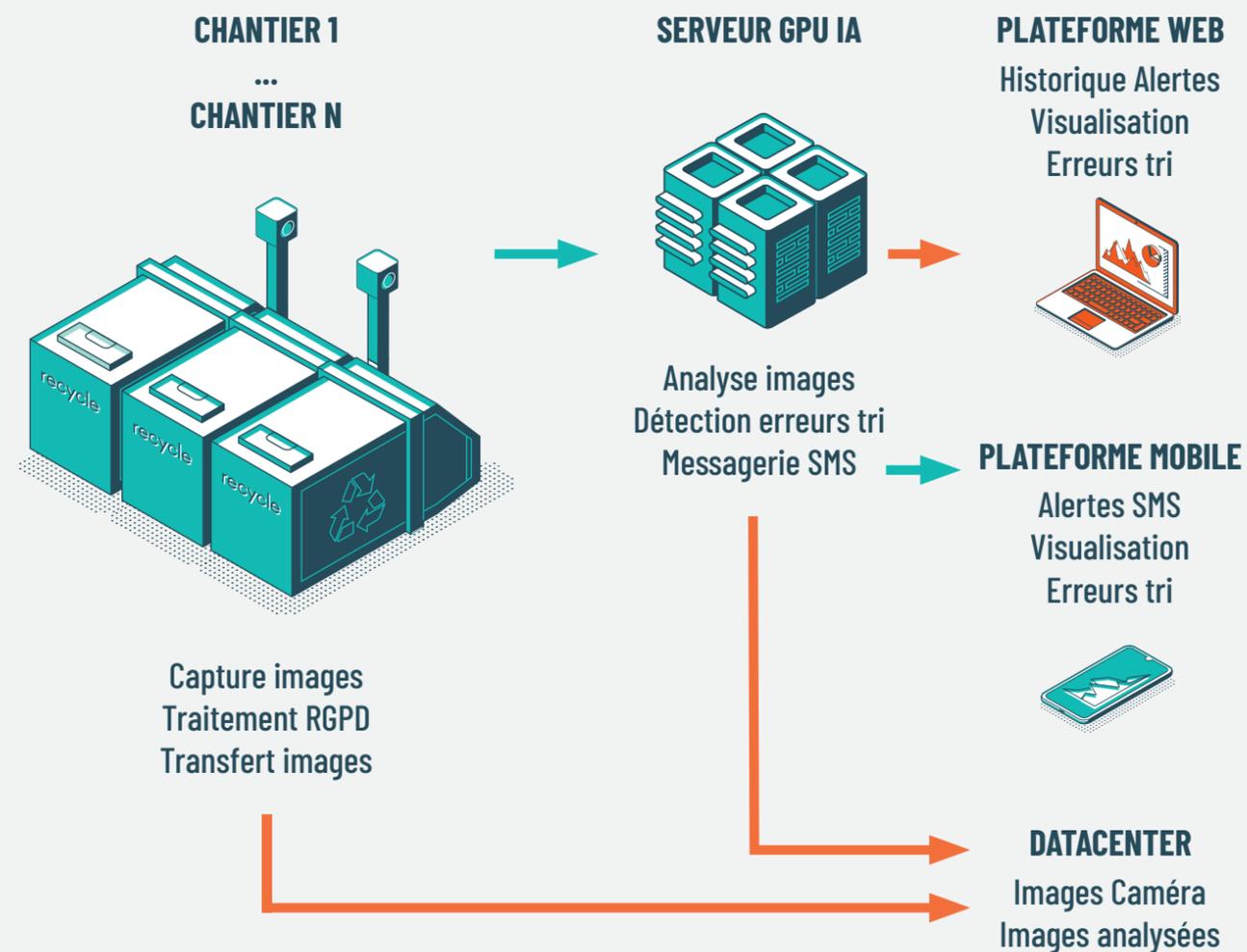
## OPTIMISER LE TRI DES DÉCHETS DE CHANTIERS GRÂCE À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Bouygues Bâtiment France et l'équipe de la Data Factory mènent un projet pilote sur la captation et l'analyse d'images de bennes de chantier pour améliorer le tri des déchets. L'expérimentation porte sur un processus de bout-en-bout : dispositif de captation ; floutage des visages dès la prise de vue en conformité avec le RGPD ; transmission des données ; labellisation à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique entraînés à reconnaître les différents types de déchets ; système de notification visuelle accompagnant le geste de tri. Ce système permet d'alerter les compagnons lorsqu'une benne est pleine ou en cas d'erreurs de tri. Cette démarche, qui permet aux compagnons de progresser dans le tri, pourrait offrir un bon retour sur investissement en permettant de faire baisser les coûts d'enlèvement des déchets. Elle va bientôt devenir une nécessité avec l'entrée en vigueur prochaine du dispositif REP (Responsabilité Élargie du Producteur). Un retour d'expérience sur cette innovation est en cours avec Colas.

## SÉCURISER ET ERGONOMISER LA MANIPULATION DES VOUSSOIRS

La R&D de Bouygues Construction a développé un robot pour enlever les cales en bois d'environ 20 kilos intercalées entre les voussoirs afin d'éviter les brisures et éclats de béton. Les voussoirs sont des blocs de béton d'environ sept tonnes destinés à être assemblés en anneau pour former un tunnel. Ils sont manipulés à l'aide d'une grue qui ventouse leur surface supérieure une fois les bois dégagés. Pour éviter la tâche manuelle pénible et potentiellement accidentogène, consistant à l'enlèvement de ces bois intercalaires, Didier JACQUES, directeur de production du chantier tunnel HS 2 (Royaume-Uni) a suggéré à Patrice ROBERT, responsable robotique chez BYTP-Matériel, l'idée d'un robot pour automatiser leur prise en charge. Séduit, ce dernier a conçu une gestuelle automatisée pour pousser, regrouper et saisir simultanément les bois. Il s'agit du premier robot suspendu, constitué d'un bras industriel, d'une pince pneumatique et de lidars unidirectionnels, développé dans le domaine de la construction. Ses trajectoires sont paramétriques et s'adaptent à chaque altitude des voussoirs. Cet assemblage inédit de technologies existantes est si astucieux et innovant qu'il sera dorénavant utilisé pour la même application sur de nombreux futurs chantiers de Bouygues Construction.

Le projet de recherche s'appuie sur un puissant algorithme de traitement, de détection et d'identification des bennes et de leur contenu. La solution intègre des fonctionnalités de gestion des données collectées, au travers d'une plateforme Cloud et permet d'estimer la valorisation financière du contenu des bennes.



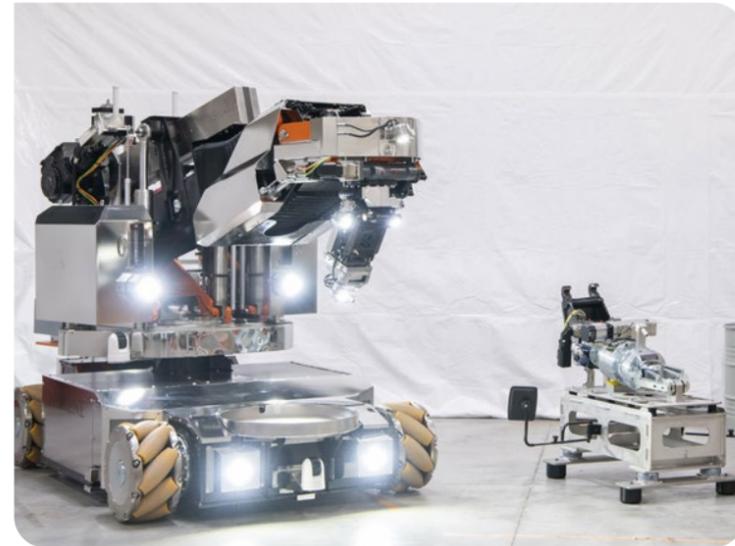
## LE SAVOIR-FAIRE ET LA CRÉATIVITÉ AU SERVICE DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Les engins téléopérés, développés par la cellule Robotique et Machines Spéciales de Bouygues Construction Expertises Nucléaires (BCEN RMS), vont là où les hommes ne vont pas pour réaliser certaines opérations de maintenance et de démantèlement. Des milieux hostiles, à forts rayonnements ionisants. La conception de tels bijoux de technologie nécessite donc une solide expertise et une réelle compréhension des conditions et contraintes en milieu nucléaire. Aussi, les défis que relèvent les ingénieurs de BCEN RMS sont multiples.

Il s'agit d'élaborer des machines hyper spécialisées dotées de fonctions et de systèmes embarqués complexes, manœuvrables à distance et capables de résister à un environnement extrême. Au cours des années, la cellule a acquis un véritable savoir-faire dans le domaine de la robotique nucléaire téléopérée. Il s'agit également de pouvoir assurer leur retrait en cas de défaillance, sans intervention humaine pour garantir la sécurité des opérateurs.

« L'un des atouts de la cellule BCEN RMS réside dans la créativité de ses concepteurs qui savent développer des solutions techniques à la fois innovantes et répondant parfaitement aux exigences de nos clients », affirme Éric MERKULOW, chef de service expertises nucléaires. Alors que de nombreux bureaux d'études font de l'intégration technologique, BCEN RMS recherche des idées novatrices et élabore, souvent à partir d'une feuille blanche, les systèmes (mécaniques, électroniques, logiciels, etc.) pour équiper ses robots sur-mesure.

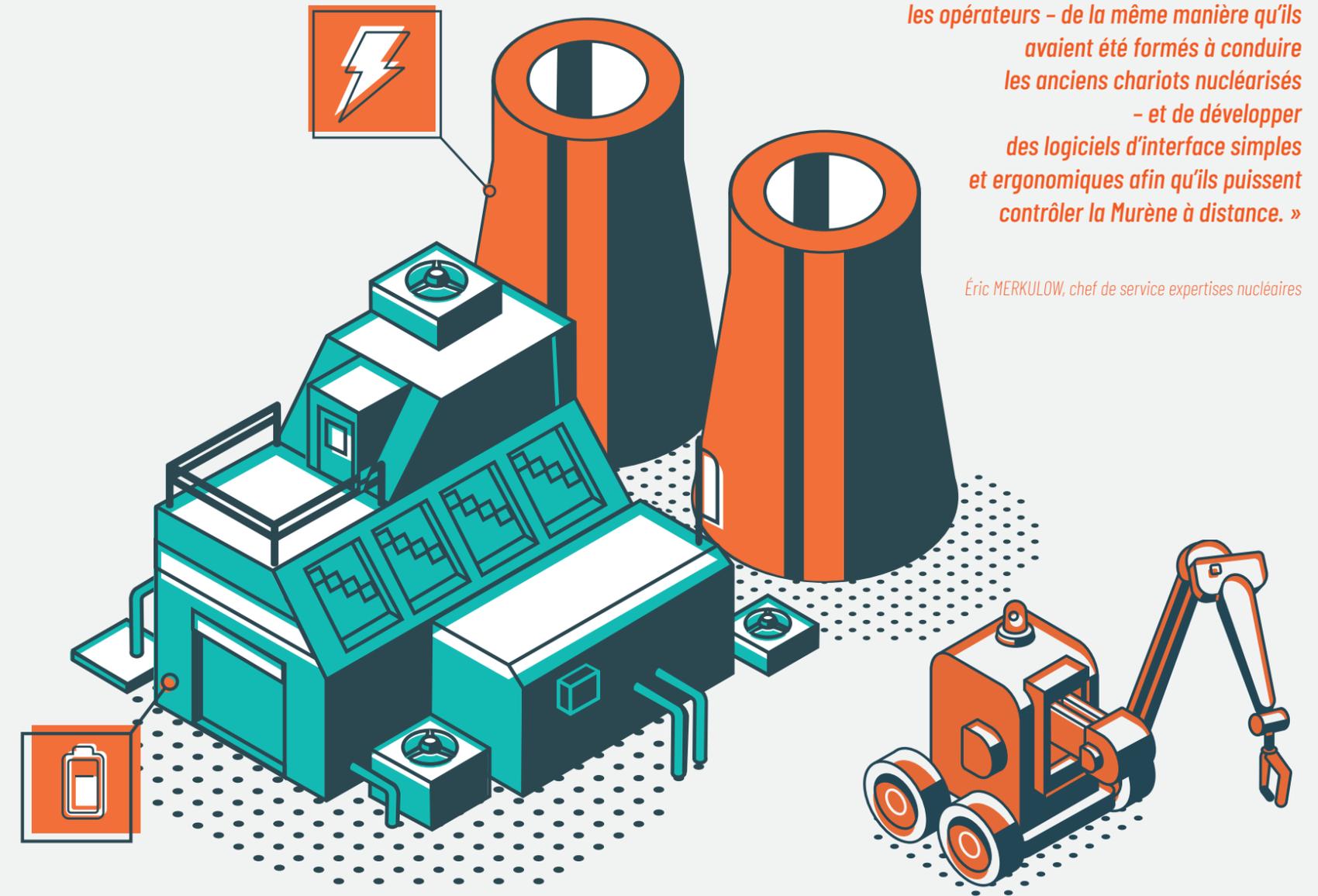
Le « **super aspirateur** » **Gobie** et l'engin de manutention de fûts radioactifs **Murène**, développés pour le CEA afin d'optimiser les opérations de reprise d'anciens fûts de déchets du site nucléaire de Marcoule, illustrent parfaitement le processus de conception et l'innovation déployés au sein de BCEN RMS. La Murène est destinée à remplacer les chariots nucléarisés « rascasses », équipement lourd et peu manœuvrable nécessitant la présence d'un conducteur. Ces deux machines téléopérées permettent d'éviter l'exposition du personnel aux rayonnements ionisants et d'augmenter la cadence de reprise de fûts. Fruits d'échanges permanents avec les équipes du CEA et d'un formidable travail de qualification, ils regorgent d'ingéniosité. Par exemple, pour Gobie, BCEN RMS a inventé un pot filtrant à détection de remplissage qui a fait l'objet d'un brevet. L'équipe a également proposé des roues motrices holonomes, permettant une mobilité parfaite des deux robots dans les casemates exigües de Marcoule. Si le passage à la téléopération permet de limiter l'intervention humaine pour certaines tâches, il ne s'agit en aucun cas de supplanter les opérateurs.



La Murène, dispositif téléopéré dédié à la reprise des fûts en casemates

## UN PROCÉDÉ D'ENCAPSULATION DE POINTE POUR LE DÉMANTÈLEMENT DE FUKUSHIMA

Dans le cadre du démantèlement de la centrale de Fukushima Daiichi, Bouygues Construction Services Nucléaires (BCSN) s'est vu confier le développement d'une solution innovante pour supprimer le risque de remise en suspension de particules nucléaires lors de la découpe d'éléments de structure contaminés. Tirant parti de son savoir-faire reconnu en conditionnement des déchets nucléaires, BCSN a mis au point un procédé d'encapsulation des débris à partir de résines. Ses connaissances approfondies des résines les mieux adaptées aux besoins de l'industrie nucléaire lui ont permis de sélectionner les meilleurs produits (offrant une bonne tenue en environnement hostile, une facilité d'application, une modularité et la capacité à être pelés pour minimiser la quantité de déchets). Ces résines, qui viendront enrober les débris métalliques, pourront être pulvérisées à 35 mètres du point d'application à l'aide d'une machine spéciale équipée d'un bras téléopéré.



« Nous avons fait le pari de former les opérateurs – de la même manière qu'ils avaient été formés à conduire les anciens chariots nucléarisés – et de développer des logiciels d'interface simples et ergonomiques afin qu'ils puissent contrôler la Murène à distance. »

Éric MERKULOW, chef de service expertises nucléaires

# SAFETY

## ASSISTANCE MÉCANISÉE POUR LA POSE DE CANIVEAUX

La pose de caniveaux en bordure de voie ferrée est une activité fortement sollicitante. Ces lourds blocs de béton dans lesquels sont logés divers câbles de signalisation et de télécommunications sont transportés sur un chariot le long des rails, puis soulevés par les compagnons jusqu'au pied de la voie sur un terrain instable, le ballast. La R&D de Bouygues Énergies & Services, assistée par le pôle R&D Ergonomie Productivité et Équipements de Chantier de Bouygues Construction, a développé un système pour faciliter et sécuriser cette tâche. **Il s'agit d'un chariot mécanique qui permet aux compagnons de faire glisser chaque portion de caniveau au pied de la voie sans effort physique, comme sur un toboggan.**

Des tests effectués sur une voie ferrée désaffectée ont permis d'améliorer le premier prototype à partir des retours des compagnons et des recommandations des ergonomes. Aujourd'hui, Bouygues Énergies & Services dispose d'un prototype opérationnel qui doit être testé en conditions réelles.

*Une collaboration importante entre les équipes de Bouygues Énergies & Services, de la R&D de Bouygues Construction et du E-Lab de Bouygues SA, au service du bien-être des compagnons impliqués dès le début dans la conception de ce prototype. Cet outil répond ainsi parfaitement aux contraintes opérationnelles et diminue fortement les sollicitations physiques imposées par cette activité. La mise en situation réelle permettra encore son amélioration.*

*Philippe RICHARD, responsable R&D du pôle Ergonomie*



## UNE DÉMARCHE SCIENTIFIQUE POUR PRÉVENIR LES RISQUES MAJEURS LIÉS AUX ENGIN DE CHANTIER

L'utilisation d'engins engendre des risques, tels que le renversement d'engin ou les collisions engins-piétons, sur tous les chantiers. Piloté par le pôle R&D Ergonomie et Productivité, le projet **Smart Safety** vise à réduire ces risques grâce à une démarche scientifique et holistique avec comme ambition le « **zéro accident** » sur les chantiers. Dans un premier temps, une vaste enquête qualitative conduite auprès d'une centaine de compagnons a révélé que les risques chantiers résultent d'une combinaison de facteurs : techniques, organisationnels, mais aussi

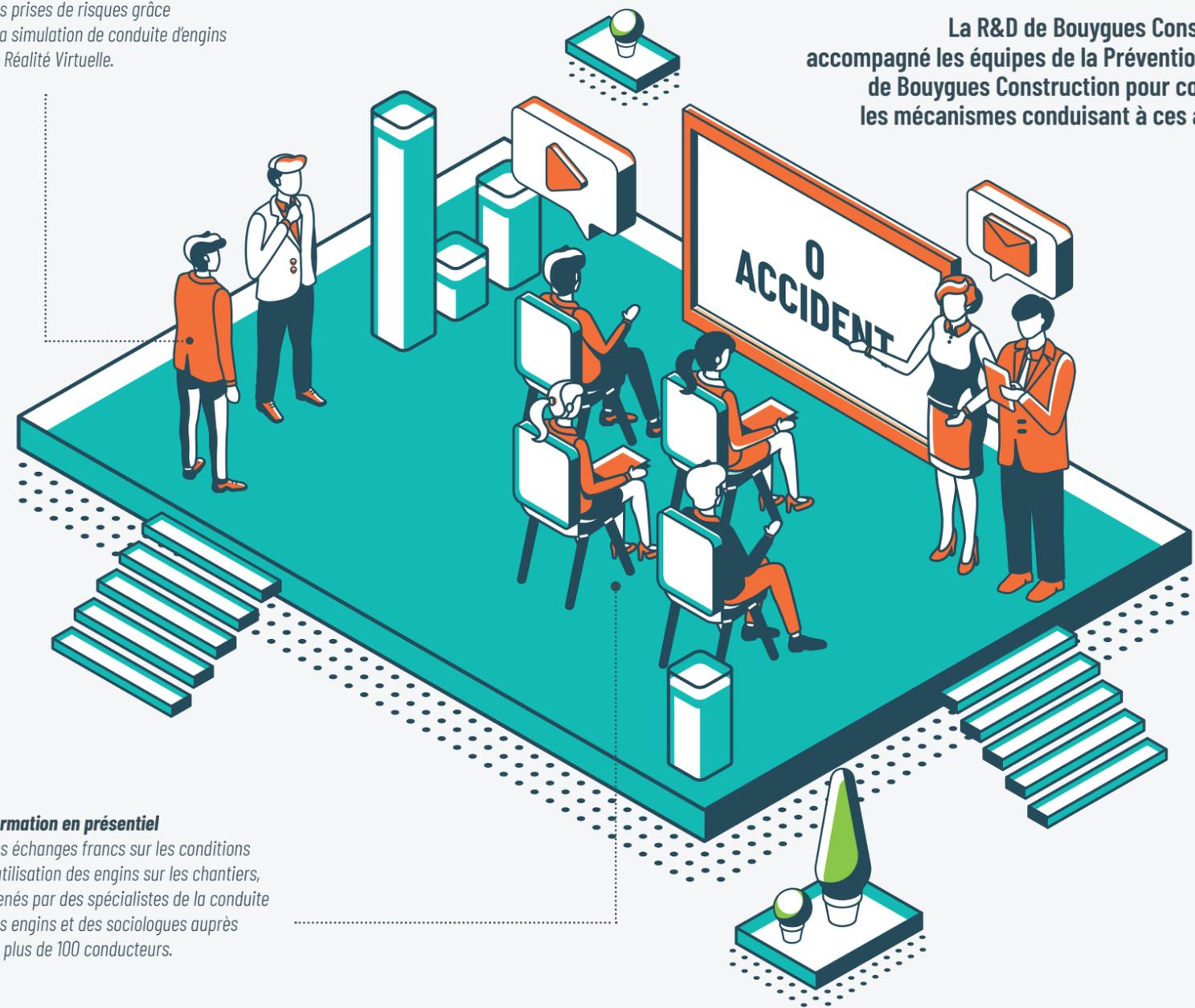
humains. Ces derniers incluent une charge cognitive trop importante des conducteurs d'engins et une sous-estimation des comportements à risques. Partant de ce constat, le pôle a ensuite mené des expérimentations techniques (sur des dispositifs d'alerte intelligents, par exemple) combinées à une sensibilisation des conducteurs ainsi que des équipes d'encadrement et de prévention comprenant des formations théoriques et pratiques ainsi que des exercices sur simulateur d'engin.

« Une première dans le monde du BTP : une analyse objective des facteurs humains engendrant des prises de risques et une première ébauche de résolution grâce à des mises en situation et des formations centrées sur la prise de conscience des risques encourus. »

Maude DEMENOIS, ergonome et responsable de projets R&D

### Formation interactive

Une mise en situation permettant de percevoir les conséquences des prises de risques grâce à la simulation de conduite d'engins en Réalité Virtuelle.



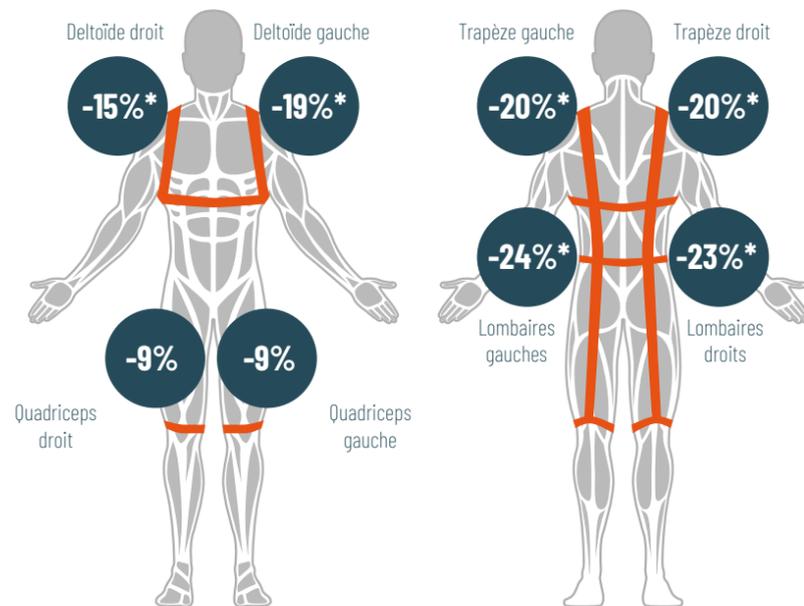
## 30 % DES ACCIDENTS SURVENANT SUR LES CHANTIERS IMPLIQUENT UN ENGIN

La R&D de Bouygues Construction a accompagné les équipes de la Prévention et Santé de Bouygues Construction pour comprendre les mécanismes conduisant à ces accidents.

### Formation en présentiel

Des échanges francs sur les conditions d'utilisation des engins sur les chantiers, menés par des spécialistes de la conduite des engins et des sociologues auprès de plus de 100 conducteurs.

Nos capteurs contiennent des accéléromètres à très haute résolution qui mesurent l'activité musculaire en écoutant en profondeur les contractions.



## La captation ergonomique : une mesure objective des positions et de l'effort

Depuis plusieurs années, le pôle R&D Ergonomie Productivité et Équipements de Chantier de Bouygues Construction utilise des capteurs positionnés sur différents segments du corps pour mesurer les gestes et les postures des compagnons au travail. En complément des vidéos prises sur le terrain, ils fournissent une donnée objective qui n'est pas soumise à l'interprétation de l'observateur. À cela s'ajoute désormais la mesure de l'effort à l'aide de capteurs équipés de petits accéléromètres de très haute résolution qui « écoutent les muscles ».

Cette approche innovante dans le secteur de la construction fiabilise l'analyse ergonomique et sert de base à la préconisation de matériels. Lors d'une expérimentation, le pôle Ergonomie a demandé à un compagnon de réaliser un coffrage de plancher avec six matériels différents, mesurant et analysant les positions et les efforts liés à l'usage de chacun d'eux. Il a ensuite sélectionné les matériels les plus adaptés et sûrs pour ce type d'activité.

**Avec l'Université de Versailles  
Saint-Quentin-en-Yvelines,  
nous formons les bancheurs  
grâce à la réalité virtuelle**

Bouygues Construction et l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines relancent leur partenariat pour doter Virtual Compagnon des dernières technologies immersives. Ce simulateur en réalité mixte est destiné à former les bancheurs à la bonne utilisation de la barre à mine. Il repose sur une plateforme robotique qui simule la sensation de toucher et fournit un retour haptique sur un environnement virtuel qui permet une immersion totale de l'utilisateur dans le chantier et la visualisation des gestes qu'il effectue. **Virtual Compagnon** a été testé auprès de novices et de compagnons. Les résultats ont montré une meilleure compréhension des bonnes postures par rapport à d'autres modes de formation. Il est actuellement en démonstration à Challenger (siège social de Bouygues Construction), dans la salle DesignLab.





# 103

## INTÉGRER LES TENDANCES ÉMERGENTES ET LES NOUVEAUX USAGES

LA R&D ACCOMPAGNE LA MUTATION DE NOS MODES DE VIE ET DE NOS MODES DE TRAVAIL.

Nous anticipons les usages de demain et tirons pleinement parti du potentiel des technologies de l'information et de la communication pour proposer de nouveaux services aux collectivités, aux citoyens et aux entreprises. Dans la ville intelligente et durable que nous imaginons, chaque élément de l'environnement construit produit, communique et se nourrit de données pour une gestion efficace des ressources et des interactions. Bâtiments, infrastructures et mobilités font l'objet d'une mise en miroir numérique pour optimiser leur usage et leur fonctionnement.

# BÂTIMENT

## DES ESPACES DE BUREAU FLEXIBLES, TAILLÉS POUR LES NOUVEAUX MODES DE TRAVAIL

Développé par Plan Group qui l'expérimente dans son siège social à Toronto, **Agile Office aide les propriétaires et locataires de bâtiments tertiaires à relever les défis liés à l'émergence des modèles de travail hybride et aux nouvelles attentes des occupants.** À l'heure où les collaborateurs recherchent un environnement de travail plus flexible, les employeurs s'efforcent de mieux comprendre comment optimiser leurs bureaux et d'améliorer l'expérience utilisateur tout en gérant les coûts d'exploitation.

Construite sur un moteur d'intégration qui comprend un jumeau numérique, la solution Agile Office permet aux applications de l'entreprise (logiciel de réservation de bureaux, par exemple) et aux systèmes du bâtiment (éclairage, chauffage, etc.) d'échanger des informations pour automatiser les flux de travail, avec la possibilité de modéliser les changements apportés à l'espace et d'évaluer leur retour sur investissement. Actuellement, une preuve de concept de la solution Agile Office est en cours sur un site client de Bouygues Énergies & Services.

*Agile Office permet d'améliorer la productivité, le confort et le bien-être des employés tout en fournissant des analyses de données de bureau précises pour une prise de décision plus éclairée.*



## LA DATA SCIENCE AU SERVICE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

Le bailleur social Vilogia dispose d'un grand nombre de données de consommation de son parc de logements. Comment exploiter ces données pour optimiser la performance de la production de chaleur et maintenir le confort thermique des locataires ?

La Chaire Construction 4.0 et le DataLab ont joint leurs forces pour mener une analyse exploratoire des données d'une centaine de chaudières individuelles en logement collectif. Cette analyse leur a permis d'identifier des profils de consommation et différents scénarios d'usages.

Développer ce type de démarche pourrait aider des acteurs du logement comme Vilogia à lancer des campagnes de sensibilisation pour une meilleure utilisation des chaudières ou des programmes de rénovation ciblés pour les habitations mal isolées.



Caroline LESUEUR, responsable du DataLab

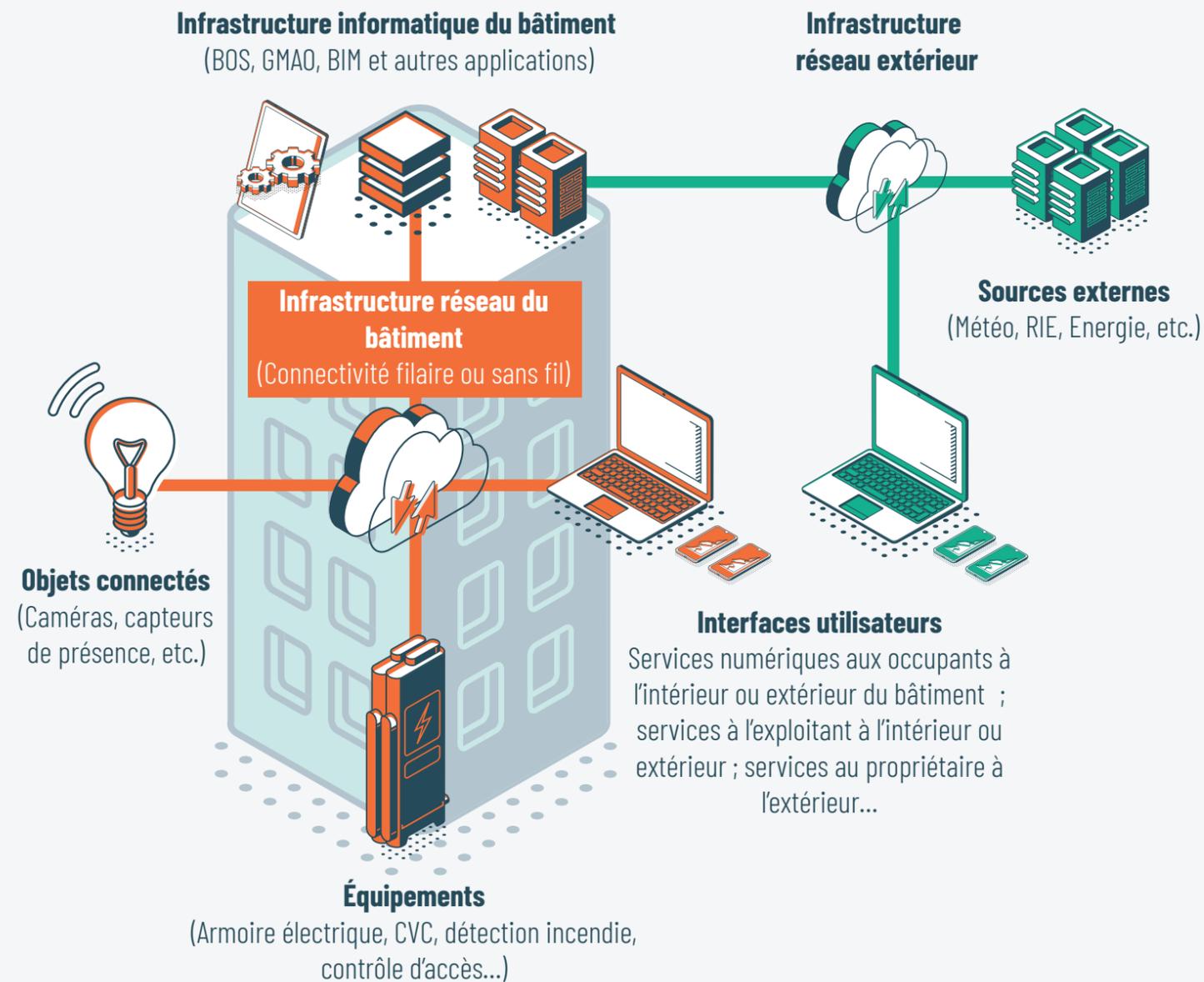
## LA R&D DESSINE LES CONTOURS DU BOS, LE SYSTÈME D'EXPLOITATION DES BÂTIMENTS INTELLIGENTS

Rendu possible par la convergence de plusieurs technologies, l'essor du bâtiment intelligent nécessite la mise en œuvre d'un BOS (Building Operating System), véritable chef d'orchestre de la donnée qui facilite l'intégration de nouveaux services numériques. **Le BOS permet l'échange d'informations et assure l'interopérabilité entre l'ensemble des équipements opérationnels et objets connectés du bâtiment – quels que soient leur fabricant et leur protocole de communication – et les logiciels de services.** Il centralise et structure des données hétérogènes et les rend accessibles à tout l'écosystème. Pour poser les jalons du bâtiment intelligent de demain, la R&D de Bouygues Énergies & Services et la R&D de Bouygues Construction ont lancé une démarche d'innovation exhaustive autour du BOS, s'appuyant sur le déploiement de plusieurs prototypes en conditions réelles. Au total, cinq expérimentations ont été lancées sur six bâtiments tertiaires en France et à l'étranger avec des partenaires issus d'horizons variés (fabricants GTB, fournisseurs de Cloud, etc.). Différentes architectures (BOS mono-site ou multi-sites, hébergé dans le Cloud ou en local) ont été testées, répondant à des cas d'usages divers.

Le prototype de BOS multi-tenant Microsoft-Iconics a permis la mise en commun de données de deux bâtiments situés dans des pays différents, avec le déploiement de cas d'usages axés sur la gestion de l'espace et le confort des utilisateurs. Le BOS Google a collecté les données (énergétiques, d'occupation, etc.) de trois sites internationaux en vue de proposer des services au Facility Management. L'expérimentation Ignition visait à tester le déploiement rapide d'une solution BOS « sur étagère » dans un bâtiment unique et à créer un parcours visiteur VIP complet. Le BOS Prisms-Akka répond à la question du retour au bureau post-Covid. Celui en cours d'études sur le site Bouygues Construction de Pas-du-Lac s'intéresse au suivi énergétique d'un bâtiment.

Ces expérimentations ont permis à Bouygues Énergies & Services d'évaluer les performances de différentes solutions, de développer plusieurs familles de cas d'usages et de définir le fonctionnement d'une architecture-type de BOS sécurisée. Elles ouvrent de nouvelles possibilités pour les bâtiments existants et futurs dans l'optique de répondre aux attentes de demain. Des bâtiments intelligents, caractérisés par une efficacité de l'exploitation-maintenance pour une meilleure gestion des performances énergétiques et par de multiples services pour les exploitants et les occupants.

## Bâtiment tertiaire (neuf ou existant)



# VILLE

## LA DATA AU SERVICE DE L'OPTIMISATION DES PARKINGS PUBLICS

De plus en plus de villes partagent leurs données sur le taux de remplissage des parkings publics dans une démarche Open Data. **Développé au sein du DataLab, l'outil Dataparking collecte ces données en temps réel dans une vingtaine de villes françaises et suisses** (cela correspond à environ 100 000 places de stationnement). Cela permet à Bouygues Construction d'avoir une vue globale des places disponibles à l'échelle d'un territoire et d'échanger avec les collectivités autour de l'optimisation de leur infrastructure de stationnement, pour construire moins, dans une optique de réduction des émissions carbone. **« Dataparking, c'est finalement une cartographie des espaces sous-utilisés et des opportunités possibles. Ce projet est un cas concret d'exploitation des données pour optimiser les ressources »**, explique Alexandre GARCIN, responsable Construction Durable & Innovation chez Bouygues Bâtiment Nord-Est.

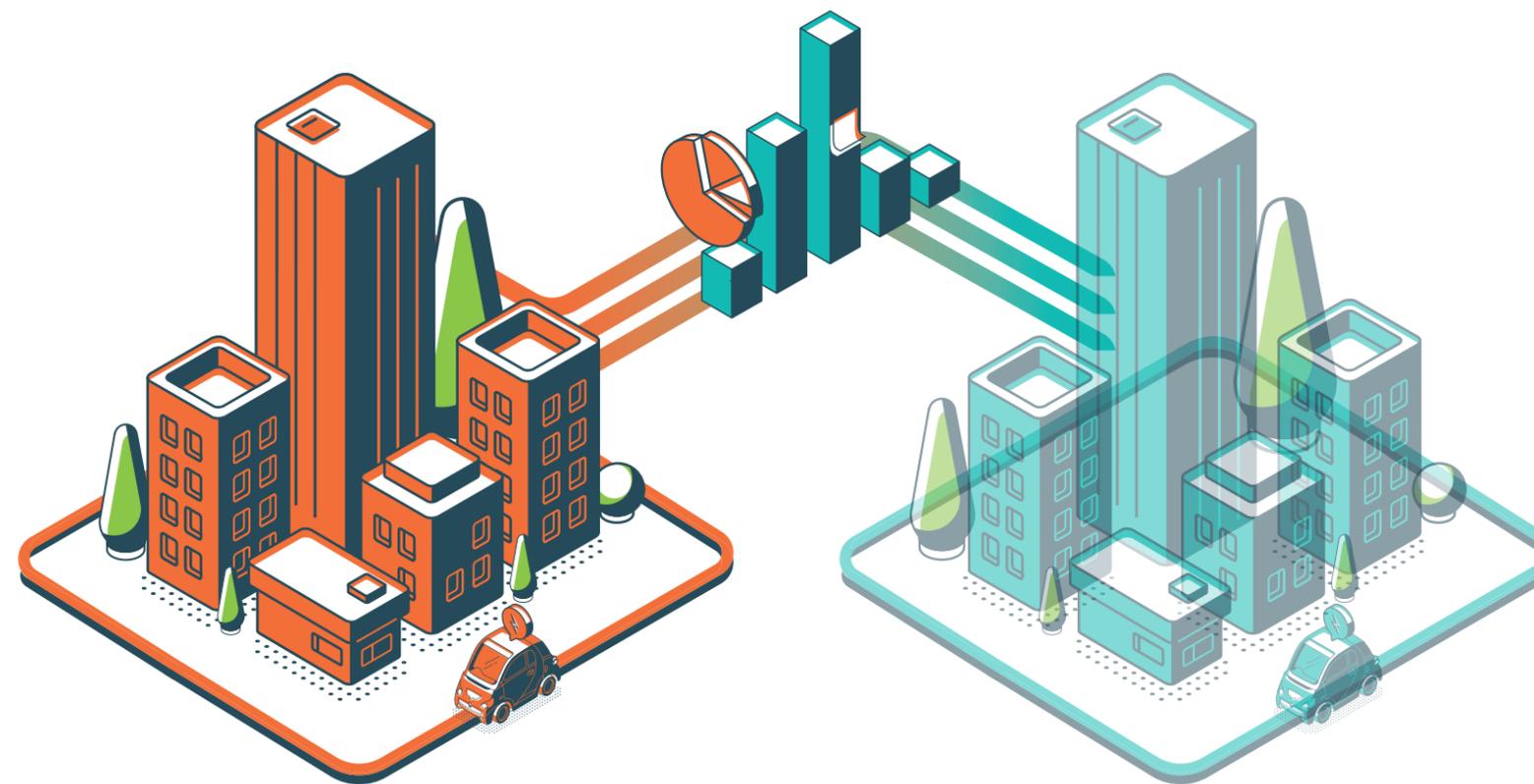
## VALORISER LES DONNÉES D'USAGE POUR LES QUARTIERS URBAINS DURABLES DE DEMAIN

Piloté par Losinger Marazzi, **le projet Timéa vise à comprendre l'activité des quartiers en exploitant des données d'usage et à développer de nouvelles offres pour ses clients (les investisseurs institutionnels) et les résidents**. Anonymisées, les données (consommation énergétique, taux d'occupation des parkings, utilisation des ascenseurs, messages des réseaux sociaux de quartier, etc.) sont stockées, puis agrégées sur une plateforme informatique. En 2020, la filiale suisse de Bouygues Construction a lancé une première expérimentation en partenariat avec Microsoft qui lui a permis de démontrer la valeur de ces données de quartier. Leur analyse peut en effet fournir des informations intéressantes permettant, par exemple, de suivre le taux de positivité d'un quartier (à partir de l'analyse sémantique de messages postés sur un réseau social de quartier) ou faire des prévisions de consommation d'électricité ou de chauffage. Suite à cette expérience, elle passe aujourd'hui à l'étape suivante : équiper un prototype de quartier d'une infrastructure permettant la collecte de données d'usage en vue de leur analyse croisée.

## LA GRANDE MOTTE, UN PROJET PIONNIER DE JUMEAU NUMÉRIQUE DU TERRITOIRE

**La mise en œuvre du jumeau numérique, outil puissant pour la gestion des villes**, nécessite de bien définir les besoins, les objectifs et les ressources internes des collectivités afin de déployer les cas d'usage les plus pertinents. C'est la démarche engagée par Bouygues Énergies & Services dans le cadre de l'expérimentation menée à la Grande Motte. Le projet vise à moderniser le parc d'éclairage public de la commune pour faire des économies d'énergie.

La mise en place d'un jumeau numérique permet d'en optimiser l'exploitation et la maintenance et de réduire les coûts. Tirant parti du potentiel technologique et collaboratif de la Plateforme de Management Numérique des Projets (PMNP), développée en partenariat avec Dassault Systèmes, Bouygues Énergies & Services a ainsi modélisé la maquette numérique de la ville, intégrant tous les moyens d'éclairage et les données associées pour une visualisation en temps réel et 3D des équipements.



## Une alliance avec l'Université de Cambridge autour des services digitaux de demain

En mai 2021, Bouygues Construction rejoignait la Cambridge Service Alliance, fondée en 2010 par l'Université de Cambridge pour le développement de nouveaux services basés sur les technologies émergentes. Ce partenariat permet à Bouygues Construction de bénéficier d'un accès privilégié à un réseau d'entreprises, à des événements et des communautés d'intérêts. Il représente une belle opportunité de mener des travaux de recherche sur le jumeau numérique et l'intelligence artificielle dans une démarche centrée utilisateur grâce à la mise en place d'une méthodologie scientifiquement éprouvée. En 2022, Bouygues Construction et la Cambridge Service Alliance ont renforcé leurs liens, poursuivant la collaboration sur ces sujets en se concentrant sur la digitalisation de l'expérience client.

## ŒUVRER EN FAVEUR DE LA RÉSILIENCE DES BÂTIMENTS ET DES ÎLOTS URBAINS

Le concept de résilience territoriale décrit la capacité d'un territoire à anticiper, réagir et s'adapter aux perturbations ou crises auxquelles il est confronté, qu'elles soient d'ordre environnemental, économique ou social. Appliquée au bâtiment ou à l'îlot urbain, une stratégie de résilience implique à la fois de traiter les causes de ces perturbations (atténuation) et leurs conséquences (adaptation). Face au changement climatique, il s'agira de concevoir des ouvrages bas carbone qui résistent mieux aux canicules, aux possibles inondations ou à d'autres risques prévisibles à l'avenir en recourant, par exemple, à l'architecture bioclimatique. **« Le concept de résilience est intéressant pour le secteur de la construction car il nous invite à adopter une approche globale et systémique et à s'engager dans une vision à long terme »**, affirme Xavier GAUVIN, responsable projets R&D.

En matière de conception, on s'intéressera aux ouvrages dans leur ensemble, à leurs différents composants (matériaux, équipements, etc.) et à leur insertion dans un environnement plus large. Pour rendre opérationnelle cette stratégie, la R&D de Bouygues Construction mène un travail de prospective et d'amélioration des connaissances. **« Il faut ensuite adapter ces connaissances techniques et scientifiques pour les rendre accessibles aux collaborateurs du Groupe, puis décrire un processus leur permettant de passer à l'action. »** Xavier GAUVIN travaille, par exemple, sur un cahier de conception des îlots de fraîcheur urbains qui vise à aider les équipes opérationnelles à s'approprier le sujet et détaille les différentes étapes pour amorcer le changement et proposer des solutions efficaces.

*« Dans un premier temps, notre rôle est d'explorer les problèmes, de dresser un état des lieux des solutions et d'évaluer leurs performances en s'appuyant sur la littérature et les résultats d'essais existants. »*

Xavier GAUVIN, responsable projets R&D



## Chaire Économie Circulaire de l'ESSEC : imaginer les modèles d'affaires circulaires de demain

Le bâtiment circulaire fait son chemin dans la construction, incluant les concepts de réversibilité, d'évolutivité, de mutualisation ou d'économie de la fonctionnalité. Mais un tel bâtiment est-il économiquement viable ? C'est la question posée par Bouygues Construction aux étudiants de l'ESSEC, dans le cadre de la chaire Économie Circulaire créée par l'école de commerce. **Leur mission : apporter leur vision « business » pour évaluer le coût d'un bâtiment circulaire et imaginer des modèles d'affaires permettant son déploiement.** Après trois mois de travail, ils ont fourni un outil d'aide à la décision qui a été testé sur la réversibilité. Cet outil sera intégré au projet de R&D Circular Design Experience (CDE), ayant pour objectif de doter les équipes opérationnelles d'instruments pour développer des projets de construction circulaire.



## L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR UNE EXPLOITATION PÉRENNE DES RÉSEAUX DE FIBRE OPTIQUE

Les armoires de rue sont essentielles pour acheminer la fibre optique jusqu'aux abonnés. Il y a deux ans, Bouygues Énergies & Services, opérateur d'infrastructure, faisait évoluer les règles de l'Arcep en militant pour la systématisation d'un compte-rendu photo des interventions réalisées par les opérateurs commerciaux sur ces armoires dans le but d'améliorer la qualité de l'exploitation et des raccordements sur les réseaux fibre.

En parallèle, le groupe a développé une solution d'intelligence artificielle pour l'analyse automatique de ces photos, permettant de détecter différentes malfaçons et dégradations telles que des jarretières débranchées ou des tambours (supports sur lesquels on pose les jarretières) endommagés.

*« L'intérêt n'est pas seulement commercial, il est d'ordre public. Les armoires de rue sont des biens communs et des dégradations sur une seule d'entre elles peuvent impacter des centaines d'abonnés. »*

David ROCHE, responsable raccordement chez Bouygues Énergies & Services.



# QUAND LA R&D RÉINVENTE LA CONSTRUCTION

**La R&D est indispensable et stratégique pour anticiper les évolutions du monde de demain, comprendre et s'approprier les opportunités des mutations technologiques.**

« Chez Bouygues Construction, nous avons à cœur de booster nos activités de R&D pour impulser le développement, la transformation et la différenciation du Groupe.

**Industrialiser et construire sans détruire** : pour y parvenir, nous consolidons nos efforts pour concevoir et construire des bâtiments et des ouvrages plus respectueux de l'environnement grâce à des technologies de matériaux plus économes en ressources et à faible intensité carbone. **Nous levons les verrous technologiques pour optimiser la conception et augmenter la valeur des projets. Nous identifions les besoins futurs des chantiers.**

Les exemples qui figurent dans cette publication illustrent ces efforts. Loin d'être exhaustifs, ils sont toutefois représentatifs du dynamisme, de l'esprit d'innovation et de la passion qui règnent chez Bouygues Construction. Ces valeurs sont celles des équipes de R&D investies dans tous les métiers du Groupe et partagées avec les nombreux partenaires technologiques et académiques.

**Nous avons l'ambition de rester pionniers** et de favoriser toujours plus cette collaboration ; nous invitons tous ces acteurs à continuer à partager avec nous leurs idées et leur vision de la construction de demain. »

*Thiébault CLÉMENT, directeur R&D*

## REMERCIEMENTS AUX INTERVIEWÉS

Alexandre GARCIN, Amélie VENEROSY, Baptiste BURNIER-FRAMBORET, Benjamin NGUYEN, Bruno LINÉATTE, Calin VAIDA, Camille GAUTIER, Caroline MAZZOLENI, Christian CREMONA, Christian DE NACQUARD, Christophe GERVAIS, Constance DUBOURDIEU, Damien BAHON, David ROCHE, Dwayne HOWDEN, Eric MERKULOW, Eric TOURNEZ, Franck PEYSSON, Frédéric GAL, Jonathan JONES, Julien FLÉCHARD, Justine BOUMIER, Karthic MOURELIDAR, Laure DUCOULOMBIER, Lou SACHETTINI, Ludovic REVERDY, Magali LE COZE, Maude DEMENOIS, Maxime HUGONNET, Morgane JOSSIC, Nicolas BRAUD, Philippe RICHARD, Roland PRIN, Romain BONNET, Sara HASSEN, Sylvain GERY, Thierry DENUAULT, Thierry JOST, Xavier GAUVIN, Yohann VALABLE.

## CRÉDITS

**Direction de la publication :** Thiébault CLÉMENT, Directeur R&D de Bouygues Construction // **Comité éditorial :** Pascale AGOTTANI, Nicolas BRAUD, Mathieu CALIBRE, Catherine CUIILLIER, Servan LACIRE, Thibault MARICOT // **Architectes :** Valode et Pistre Architectes, Résidence ABC, Studio KO, Musée YSL, Bjarke Ingels Group et Carlo Ratti Associati, CAPITASPRING // **Rédaction :** Claire GERARDIN, Julia COULIBAY // **Conception & réalisation graphique :** Agence 5H55.

**Crédits photos :** © Laurent ZYLBERMAN, Julien CRESP, MYPHOTOAGENCY, Augusto DA SILVA, Rachid ANNAN, Christian CREMONA, Arnaud FÉVRIER, Nicolas GROSMOND, Pascale AGOTTANI, Damien BAHON, Baptiste BURNIER-FRAMBORET, Yves CHANOIT, SO DUPONTRENOUX, PHILIPPE GUIGNARD, GONCHARUKMAKS, PIXELS HUNTER, FERRANTRAITE, TORTOON, U PHOTOSTOCK, MALP, SHOOARTS, PHOTOGRAPHEE.EU, VECTORPOUCH.

**Impression :** Papier Fedrigoni Soho Symbol Freelifa satin - Octobre 2022.

1<sup>ère</sup> résidence collective autonome de France, ABC vise une autonomie annuelle en énergie de 70%, Grenoble.



Bouygues Construction  
1, avenue Eugène Freyssinet - Guyancourt 78061 - Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex - France

[www.bouygues-construction.com](http://www.bouygues-construction.com)

[www.blog.bouygues-construction.com](http://www.blog.bouygues-construction.com)  
[@Bouygues\\_C](https://twitter.com/Bouygues_C)

