

Le *smart building* : pour un bâtiment durable et désirable

En règle générale et en première intention, on définit le *smart building* comme étant un bâtiment connecté et capable de communiquer. S'il est primordial qu'il permette la gestion automatisée des différents équipements, il doit avant tout se mettre au service d'une urbanisation durable. En présentant un panel de solutions et services numériques puis des « modes de faire » où la frugalité des ressources et des moyens devient le maître-mot, et en illustrant le propos au travers d'une approche territoriale inédite, on ouvre la réflexion vers une plus grande ambition d'inclusivité d'un bâtiment dans lequel il fait bon vivre.

SOMMAIRE

- 1 • Préambule : contexte et enjeux
- 2 • Solutions et services numériques
- 3 • *Low tech* et frugalité
- 4 • Approche territoriale : l'exemple des Hauts-de-France
- 5 • Conclusion
- 6 • Références

Alain Peuvot

Architecte DPLG de formation et titulaire du MBA spécialisé Smart City et Smart Energy de l'Institut Léonard de Vinci, Alain Peuvot a une expérience de 30 ans dans la diffusion de solutions de conception assistée par ordinateur (CAO), systèmes d'information géographique (SIG) et systèmes de gestion technique et énergétique de patrimoines immobiliers. Aujourd'hui, il mûrit sa réflexion pour le développement de territoires écoresponsables. Il est associé et évaluateur chez Time for the Planet. Time for the Planet (TFTP) est une entreprise à mission créée en avril 2019. Société de participation collective citoyenne ambitieuse et passionnée à but non lucratif, elle a pour objectif de créer et financer des entreprises innovantes (technologies open source) en vue d'avoir un impact fort dans la lutte contre le changement climatique en France et à l'étranger.

1 Préambule : contexte et enjeux

Que ce soit dans des revues scientifiques ou des documents grand public, de plus en plus d'objets et même de modèles ou d'objectifs managériaux se voient affublés du terme anglais *smart*, qui traduit l'adjectif « intelligent » pour caractériser un esprit éveillé, brillant et fin, mais aussi la justesse, la clarté, parfois la simplicité, voire l'élégance de quelque chose ou de quelqu'un.

Pour qu'un bâtiment puisse être qualifié d'intelligent, il convient qu'il soit capable de répondre aux défis d'une société en mutation où les enjeux sont tout à la fois de nature :

- environnementale :
 - écologie : réduction des prélèvements de ressources non renouvelables et régulation des prélèvements de ressources renouvelables ; préservation de la biodiversité et lien à la nature,
 - climat : réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) ; adaptation au changement climatique,
 - énergie : réduction des consommations d'énergie et efficacité énergétique du bâtiment ; lutte contre la précarité énergétique ;
- sociale :
 - mixité des relations : sociale, intergénérationnelle...,
 - bien-être, santé, sécurité : qualité de l'air intérieur, confort d'été, apport lumineux, aménagement spatial, accès à la nature, prévention sanitaire, gestion des accès...,
 - diversification de l'offre : variation des typologies des entités au sein des logements, commerces ou bureaux ; adaptation des locaux communs aux besoins des usagers (mutualisation des ressources, des espaces) ; flexibilité fonctionnelle des espaces ; démarche participative impliquant les usagers ou les habitants ;
- économique :
 - développement de filières courtes : matériaux locaux bio-sourcés (bois, paille, chanvre, ouate de cellulose, roseau, liège, laine de mouton...) et géosourcés (terre crue, pierre sèche),
 - réemploi : réutilisation de matériaux de déconstruction et outils ; revalorisation des déchets et des terres excavées,
 - économie du partage et de la fonctionnalité : développement de la valeur d'usage du bâtiment.

C'est pourquoi le *smart building* représente un écosystème complexe regroupant un faisceau de qualités. Il est ainsi à la fois :

- résilient (capable de s'adapter et de surpasser les perturbations météorologiques, par exemple) ;
- inclusif (accessible notamment aux personnes à mobilité réduite) ;
- collaboratif (partagé, participatif, permissif) ;
- mutable (réversible, flexible, évolutif) ;
- frugal (sobriété en énergie et à faible empreinte carbone) ;
- serviciel (pourvu de services participant à la qualité de vie des occupants) ;
- sensible (s'adaptant aux occupants et aux usages) ;
- « *responsive* » (réactif et dynamique) ;
- ... désirable !

Cependant, la réalité conjugue des systèmes et des outils parfois contradictoires, tant *high tech* (par exemple le numérique) que *low tech* (l'écoconception, par exemple), qu'il ne faut toutefois pas opposer mais au contraire associer, quand cela est possible, en vue d'obtenir un résultat optimal. Dans ses écrits, Jeremy Rifkin prône une croissance verte dans l'abondance matérielle et énergétique sans limite, avec l'aide du numérique et de l'intelligence artificielle (IA) en particulier. Pour sa part, Pierre Rabhi était adepte de la *sobriété heureuse* en considérant la modernité comme une imposture. Pourquoi ne pas essayer de retenir le meilleur des deux afin de les concilier, de les réconcilier ?

Comment programmer, concevoir, construire et exploiter le bâtiment de demain ? Pour réduire les effets néfastes de son impact conséquent dans la ville et les territoires, de nombreuses initiatives apparaissent sous la forme de solutions techniques, de processus méthodologiques, de services d'accompagnement ou de partenariats, toutes tournées vers le même objectif d'impliquer et de remettre l'utilisateur au cœur du dispositif.

2 Solutions et services numériques

Au travers de sa digitalisation engagée désormais depuis près de deux décennies, le bâtiment poursuit sa mutation en intégrant des dispositifs techniques munis de capteurs et d'actionneurs, et des réseaux de communication entre les différents équipements permettant la circulation des données. Afin de pouvoir traiter et interpréter ces données tout en les sécurisant, plusieurs types de solutions sont mis en place, indépendamment ou de façon combinée et complémentaire, pour offrir des cas d'usage bénéfiques :

- le *building information modeling/modellmanagement* (BIM) favorise la collaboration entre les différentes parties prenantes sur toute la durée de vie du bâtiment, de sa programmation à sa déconstruction en passant par sa conception, sa construction et son exploitation, qui en constitue la phase la plus longue et sur laquelle les gains d'efficacité les plus importants

pourront être obtenus lorsque le stade expérimental actuel aura été dépassé ;

- les objets connectés, ou *Internet of things* (IoT), permettent de récolter toutes les informations sur le fonctionnement du bâtiment ;
- l'intelligence artificielle (IA), par l'acquisition de la connaissance précise du bâtiment, fournit une véritable optimisation des performances des ouvrages et permet l'adaptation des systèmes aux besoins réels des usagers. Elle est au cœur de la révolution numérique du bâtiment.

En parallèle, cette transformation s'accompagne de la mise en œuvre de services, de type énergétique (suivi de consommations et ajustements, prédictions, *smart grids*), attachés au bâtiment (maintenance multitechnique, alertes, pilotage de paramètres de confort...) ou directement destinés aux occupants (communications diverses, géolocalisation, gestion de ressources partagées).

2.1 Jumeau numérique

2.1.1 | Le BIM pour tous

L'écoconception permet au bâtiment d'avoir un impact faible sur l'environnement tout au long de sa vie et le BIM se révèle être un atout notable dès la conception, par la mise en œuvre de la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) prenant en compte à la fois les matériaux et moyens utilisés (extraction, transport), la maintenance (exploitation, entretien, réparation, rénovation) et même la déconstruction (recyclage des matériaux).

Le « jumeau numérique » est l'un des leviers de la lutte contre le changement climatique. Véritable clone d'un ouvrage réel, il permet d'améliorer la gestion de son cycle de vie et contribue à l'économie circulaire :

- en phase de conception et de prototypage, il stimule les comportements et les performances en les optimisant notamment au regard des exigences environnementales. La construction de l'ouvrage est alors plus performante ;
- en phase d'exploitation et de maintenance, il permet de s'ajuster aux comportements réels et d'anticiper les défaillances grâce aux capteurs intégrés ;
- en fin de vie, il anticipe l'obsolescence des matériaux et prépare les étapes de déconstruction.

Pourtant, alors qu'il existe depuis la fin du XX^e siècle et que les actions de communication et de formation se sont multipliées depuis 5 ans, le BIM reste sous-employé et n'est utilisé que par un nombre d'acteurs du bâtiment très limité.

Dans le cadre de la stratégie du « BIM pour tous » portée par le plan gouvernemental BIM 2022, s'est constituée officiellement le 18 janvier 2021 l'association Alliance du bâtiment (ADB), un regroupement d'acteurs indépendants pour démocratiser le BIM. À titre professionnel ou personnel, ils interviennent

dans le domaine public, parapublic, associatif et privé, dans le secteur du bâtiment et des travaux publics.

Dans son livre blanc, ADB identifie quatre facteurs clés de succès pour la mise en œuvre du BIM universel [1] :

- l’interopérabilité des données avec les applications utiles à la mise en œuvre des cas d’usage visés pour produire des livrables numériques de qualité ;
- la continuité numérique du système d’information du maître d’ouvrage pour capitaliser toutes les expertises et rendre opérant le concept d’entreprise étendue au service d’objectifs clairement identifiés ;
- la prise en compte de l’impact environnemental des échanges numériques BIM ;
- la confiance de l’ensemble des acteurs grâce à la maîtrise des données produites et du risque de dépendance induit par la plateformes des échanges.

Thierry Lehnebach, administrateur délégué chez ADB, prône une approche « agile » dans laquelle les acteurs d’un projet se mettent d’accord sur la structuration des objets et adoptent un langage commun, ouvert et libre d’usage permettant l’interopérabilité totale des données. Grâce au format Open dthX, indépendant des logiciels utilisés, chacun peut travailler dans sa spécialité avec son propre logiciel métier en interaction avec la maquette, réduisant ainsi les échanges de maquettes dont la définition géométrique représente le poids principal. Il n’existe alors plus qu’une seule maquette dans le *cloud*, renseignée par tous les métiers par des données au format ouvert IFC (*Industry Foundation Classes*). En conséquence, le poids unitaire des objets ainsi échangés diminue fortement, puisqu’une géométrie portant des propriétés représente en moyenne 500 Ko, et un jeu de propriétés structurées au format Open dthX moins de 25 Ko. Finalement, l’ensemble des protagonistes de la filière constructive, y compris les artisans et TPE qui en représentent 95 %, ont accès à une donnée issue d’un langage *low tech* vingt fois moins lourd en moyenne qu’un fichier géométrique détaillé. Cet accès transparent, universel et peu coûteux à la donnée augmente la fluidité et l’efficacité de leur collaboration, constituant ainsi autant d’atouts pour inciter les acteurs du BIM à considérer cette nouvelle approche.

| 2.1.2 | *Building operating system (BOS)*

Pour gérer le jumeau numérique commun ainsi créé et partagé par tous, le BOS apporte la fondation digitale du bâtiment et représente la chaîne de traitement logistique de la donnée : extraction, puis transport, structuration, fusion, distribution, sécurisation et enfin transformation. Il permet aussi de gérer toutes les sources de données en exposant une seule interface de programmation, ou *API (application programming interface)*, globale. D’après Jérémie Bellec, président de la société SpinalCom qui édite le BOS SpinalCore, « la limitation des capteurs et connecteurs permet de réduire les coûts d’installation au profit de la multiplication de services de qualité ».

Dans le livre blanc de la Smart Building Alliance (SBA) [2], le BOS a comme raison d’être la maîtrise de la complexité pour aider à surmonter les grands défis des bâtiments du XXI^e siècle : « Nous voyons les systèmes du bâtiment comme des systèmes complexes ouverts et à ce titre, nous définissons le BOS comme un agrégateur des produits, services et données (solutions et architectures digitales, *hardware* et *software*, *data*, information, connaissances) qui vont permettre la maîtrise de cette complexité en optimisant les flux d’information circulant au sein des bâtiments aujourd’hui. »

Dans cet ouvrage, la SBA propose une définition commune et partagée du BOS : il est le cœur du système d’information bâtimentaire BIS (*Building Information System*). C’est un logiciel ou un ensemble de logiciels « cœur de plateforme » (*middleware*) axé sur le bâtiment (*building-centric*) qui organise, gère et partage le référentiel commun du bâtiment et met en œuvre les règles du contrat de gouvernance des données partagées (fig. 1).

En conclusion, le jumeau numérique permet de représenter la complexité des systèmes des ouvrages et d’assurer leur pilotage en temps réel. Cela s’avère d’autant plus nécessaire à mesure que sa maturité augmente :

- au premier niveau, le jumeau est statique : c’est une maquette numérique représentée à un instant *t* qui estime plus finement les quantités de matériaux nécessaires et le coût réel d’un ouvrage, permettant ainsi de réduire le bilan carbone ;
- à un niveau avancé, le jumeau est dynamique et interconnecté : il peut échanger avec différents ouvrages et d’autres jumeaux numériques, et permet une gestion automatisée des systèmes, ce qui réduit l’énergie consommée.

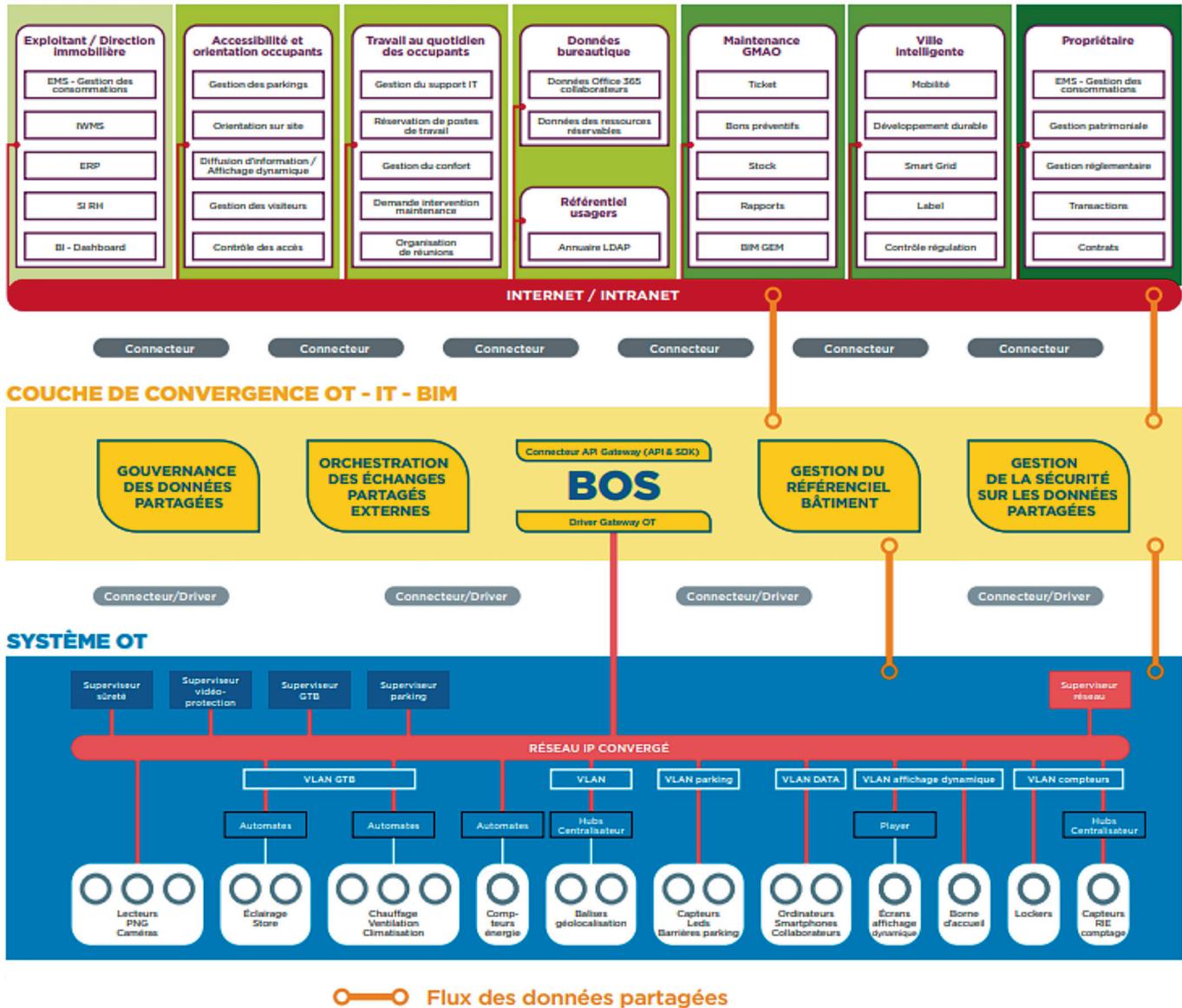
En conséquence, le jumeau numérique s’avère être un véritable allié dans la lutte contre le changement climatique en termes de réduction des matières premières et d’économies d’énergie. Il permet de vérifier comment réduire l’impact carbone à l’aide de matériaux réutilisables et de systèmes réversibles, et rend également possible l’intervention à distance. Mais désormais, la révolution numérique du bâtiment est aussi portée par l’intelligence artificielle pour améliorer l’adaptation aux besoins et sécuriser les transactions de données.

2.2 Intelligence artificielle

| 2.2.1 | *Blockchain* du bâtiment

La *blockchain* est une technologie fonctionnant sur la base d’un registre (une grande base de données) décentralisé et permettant le stockage et la transmission ultra-sécurisés d’informations entre les utilisateurs membres de ce registre sans avoir à recourir à un intermédiaire. La *blockchain* ayant gagné en maturité, ses applications dans le secteur du bâtiment se multiplient, par exemple pour équilibrer l’offre et la demande en matière énergétique, mais aussi pour de nombreux autres usages, dont un exemple remarquable est présenté ci-après.

APPLICATIONS IT INTERNES OU EXTERNES



Flux des données partagées

▲ Fig. 1. Exemple de schéma d'architecture BOS (source : livre blanc de la SBA [2]).

Désireux de solutionner les problèmes d'interopérabilité, de validité et de fluidité des données, Matthieu Merchadou Melki a cofondé Magma pour faire le lien entre BIM et *blockchain*. La plateforme Magma permet la création d'actifs immobiliers digitaux à partir de jetons non fongibles, ou *non-fungible tokens* (NFT)⁽¹⁾, garantissant leur unicité ; dans cette plateforme, chaque partie prenante (propriétaire, gestionnaire, fournisseur de services, locataire) contribue en fonction des droits d'accès qui lui sont accordés. Toute donnée validée

devient ainsi immuable et le jumeau numérique du bâtiment contient la documentation tant contractuelle (*smart contracts*) qu'architecturale (maquette numérique). Sur la base d'une valeur économique du NFT fixée au préalable, chaque contributeur de la donnée reçoit une juste rémunération, l'incitant à télécharger des données sur la plateforme en « frappant »⁽²⁾ le Magma NFT. Connecté stratégiquement à des contrats intelligents sur une *blockchain*, le modèle de bâtiment devient la vitrine indispensable de l'actif immobilier, le coffre-fort

(1) Le NFT représente la version numérique d'une chose existant dans le monde réel. C'est un actif unique qui ne peut être remplacé et peut être considéré comme un certificat d'authenticité.

(2) Frapper un NFT consiste à l'enregistrer en toute sécurité sur une blockchain afin de donner plus de contrôle sur la propriété intellectuelle des données.

de documentation et l'outil de gestion des tâches. Une expérimentation grandeur nature a été lancée avec dix foncières françaises.

Magmafy est l'indice de précision du modèle entre le bâtiment réel et le modèle numérique « frappé ». Il exprime la puissance du bâtiment telle que définie par la quantité de données fusionnées avec le modèle sur la plateforme Magma. La « magmafication » est simplement le processus de compilation des données du modèle. Elle est représentée par une barre d'état mesurée par la quantité d'informations fournies par défaut ainsi que par toutes les données supplémentaires (telles que les objets 3D, les permis, l'historique fiscal, l'équité, etc.) qui comptent pour augmenter l'exhaustivité du jumeau numérique.

En augmentant la fluidité et l'intégrité de l'information par un système de contrôle et de validation fiable et sécurisé, on réduit à grande échelle les coûts opérationnels, énergétiques et l'impact carbone de la vie d'un bâtiment. De plus, la responsabilité des usagers et de tout l'écosystème autour de l'immeuble crée un cercle vertueux n'engendrant que des bénéfices économiques, sociaux et environnementaux.

Un autre exemple d'utilisation de la technologie *blockchain* est trouvé dans la solution BimChain de l'éditeur Lutecium, dans laquelle les données échangées en BIM sont validées et certifiées par un système de preuves, rendant les échanges fluides et transparents. Ainsi exploitée avec des informations fiables, la maquette numérique, base contractuelle sur le cycle de vie complet du bâtiment, constitue alors un vecteur de confiance digitale et devient une ressource (*asset*) dotée d'une réelle valeur.

2.2.2 | *Machine learning*

L'apprentissage automatique, ou *machine learning* (ML), est un autre axe de l'intelligence artificielle. Il analyse les données en continu de manière totalement autonome afin d'en déduire des tendances. Les algorithmes de *machine learning* améliorent leurs performances au fil du temps et permettent notamment de réaliser des prédictions, telles que la maintenance prédictive d'un patrimoine immobilier.

Né en 2017 au sein du laboratoire Connaissance et intelligence artificielle distribuées (CIAD)⁽³⁾, le projet Wittym consiste à travailler avec des algorithmes d'intelligence artificielle dédiés au bâtiment afin d'exploiter automatiquement la connaissance implicite liée aux données BIM pour s'adapter à toute nouvelle situation et à tout changement en temps réel et en fonction de l'utilisateur. James Grivet, président de la société Wittym, précise [3] que la solution est basée sur une infrastructure *cloud openBIM* composée de bases de données et de microservices au

(3) Le CIAD est un laboratoire public de recherche sous les tutelles de l'université Bourgogne Franche-Comté et de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard.

format IFC nativement interopérable ; en réalisant ainsi une interconnexion à tous les systèmes en place, cette solution est garante de l'enrichissement et du partage de la connaissance sans limite ainsi que de la continuité numérique du bâtiment. Il souhaite démocratiser l'accès aux données du bâtiment, de l'expert sachant aux opérationnels du terrain, en faisant sauter les barrières techniques et financières.

Autre application utilisant la *machine learning* pour accélérer la transition écologique du secteur de la construction, SustainEcho est une plateforme qui automatise les ACV certifiées des projets de construction à partir des métrés bruts, rendant accessible l'évaluation carbone des ouvrages à l'ensemble des acteurs, experts ou non, afin de répondre sans perte de temps aux exigences environnementales de la nouvelle réglementation RE 2020. À l'occasion du salon EnerJ-meeting de mars 2022 [4], Anatole Parre, directeur technique de la société éditrice de la solution, démontrait à l'écran l'ergonomie et la simplicité de l'intégralité du processus [5] pour :

- importer directement les données brutes des métrés, quel que soit leur format ;
- valider ou modifier les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) issues de la base Inies, certifiées et actualisées, que l'IA propose en étant accompagné à chacune des étapes ;
- visualiser les impacts directement depuis la plateforme et générer automatiquement les rapports réglementaires ;
- étudier des variantes pour chacune des études (en divisant par dix leur temps de réalisation) et atteindre les objectifs en vue de l'accréditation RE 2020.

Lors du dernier colloque Real IT en octobre 2021 [6], Pauline Koch, architecte, exposait les avantages de Sitowie, société qu'elle a fondée en mai 2018 et qu'elle dirige, avec l'envie de savoir comment allaient vieillir les bâtiments qu'elle dessinait. Sitowie développe une technologie pour anticiper les risques et le vieillissement des immeubles. L'outil de simulation de décision Predibat appréhende la dégradation des constructions à l'échelle d'un bâtiment ou d'un parc immobilier dans une dimension écosystémique tenant compte d'un ensemble de facteurs d'influence (usages, matériaux, etc.) et créant de la valeur grâce à :

- la conception de bâtiments plus durables et la maîtrise des coûts de construction ;
- une économie de 10 à 40 % sur les budgets de dépenses d'investissement sur le long terme en passant d'une stratégie de maintenance curative à une stratégie de maintenance prédictive ;
- l'amélioration de la performance environnementale : l'allongement de la durée de vie des bâtiments et des matériaux entraîne la réduction de l'empreinte carbone (moins de matériaux étant consommés et moins de déchets produits) et de la consommation d'énergies ;
- l'accroissement de la rentabilité des actifs immobiliers favorisant les arbitrages lors des ventes et acquisitions : un bâtiment durable est un bâtiment rentable.

Toutes ces solutions numériques innovantes ont en commun la recherche de caractéristiques indispensables à un *smart building* :

- l’ouverture et la facilité d’accès aux données à toutes les parties prenantes ;
- la fiabilité, l’intégrité, la sécurisation, la normalisation et l’interopérabilité de ces données ;
- l’adaptation aux besoins des occupants, l’amélioration de leur confort et la réduction de leur impact carbone ;
- l’aide à l’atteinte des objectifs de développement durable fixés par décrets ou réglementation, notamment en termes de sobriété énergétique et d’empreinte carbone ;
- l’optimisation de la gestion-exploitation-maintenance (GEM) et la valorisation financière de l’actif immobilier.

Répondant à la stratégie gouvernementale « Numérique et environnement » [7] qui porte l’ambition de faire converger les transitions écologiques et numériques, ces outils digitaux sont aussi les supports de services émergents pour le bâtiment et ses usagers.

2.3 Services SBA

2.3.1 | BIM4Value

La commission BIM4Value (B4V) de la SBA est née d’un constat de désillusion de maîtres d’ouvrage estimant qu’ils investissaient dans le BIM sans vraiment en connaître la raison. Organisés autour d’une démarche bénévole en collaboration avec cinq organisations professionnelles du bâtiment⁽⁴⁾ et le Conseil national de l’ordre des architectes (CNOA), ils se sont fixé deux axes de travail afin, dans un premier temps, de lister les bénéfices attendus du BIM en fonction des usages, pour ensuite chercher à les atteindre avec une logique de création de valeur.

Il en résulte un cadre de référence qui s’adresse à tous, et pas uniquement aux grandes sociétés ni aux seuls gros projets. Sa version 2 consiste en une application accessible depuis le web (*full web*) de type « logiciel en tant que service » – *software as a service (SaaS)* – qui propose des scénarios en fonction des objectifs attendus suivant trois niveaux de maturité d’usage du BIM. Un mémo généré automatiquement comprend alors un récapitulatif des livrables par acteur, des cas d’usages conseillés et des tâches recommandées ; il constitue une véritable annexe contractuelle que le maître d’ouvrage peut joindre à son cahier des charges.

Peu importe le cas de figure et le périmètre de l’opération, B4V apporte des solutions pour aider les acteurs du projet à

⁽⁴⁾ La Fédération Cinov, le syndicat Entreprises générales de France BTP (EGF.BTP), la Fédération des services énergie environnement (Fedene), la Fédération des entreprises immobilières (FEI, ex-FSIF) et la fédération Syntec-Ingénierie.

s’organiser, à mieux collaborer et surtout à progresser dans leur pratique. Cet outil en accès libre pour tous les professionnels permet de définir les exigences requises et les modes de preuve. Il offre aussi la possibilité d’établir des règles claires de collaboration et de livrables entre les différents acteurs. Il est ainsi essentiel de se poser les bonnes questions avant toute démarche BIM :

- Que signifie concevoir en BIM ?
- Comment favoriser la collaboration entre acteurs ?
- Comment mieux appréhender la création de valeur en BIM Exploitation ?
- Comment consulter une entreprise pour un projet réalisé en BIM ?

Autant de questions abordées par ce cadre pour que la maquette numérique soit au service de la performance des bâtiments et des infrastructures.

2.3.2 | R2S-4Grids

Appuyé sur le socle technique *Ready to Services (R2S)* de la SBA, l’extension 4Grids est un label destiné aux bâtiments tertiaires sur toute leur durée de vie. Elle détermine les services à mettre en place en termes de maîtrise énergétique (services de pilotage énergétique pour l’aide à la décision et une meilleure gestion des équipements) et de flexibilité énergétique (services d’adaptation pour moduler la consommation et la production en fonction du marché de l’énergie). En pilotant les données de consommation et production d’énergie en fonction des usages, des besoins, mais aussi de la demande ou de l’offre du réseau, R2S-4Grids offre le double avantage d’une réduction des contraintes techniques et d’une augmentation de l’intérêt financier.

Si ce label facilite le respect des réglementations telles que le décret tertiaire [8] pour les bâtiments existants et la RE 2020 ou le décret *BACS* [9] pour les bâtiments neufs, Alexis Pérez, responsable Domaine numérique au sein de Certivéa, filiale du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) spécialisée dans l’évaluation et la certification de bâtiments non résidentiels, précise [10] qu’il est avant tout un engagement volontaire pour aller avec plus d’ambition écologique au-delà des réglementations, en s’appuyant sur un numérique responsable et sobre, avec des services adaptés par rapport aux niveaux de besoin.

C’est en ce sens que la première labellisation R2S-4Grids a été délivrée le 21 janvier 2022 pour la phase conception, mentions maîtrise et flexibilité, du nouveau siège administratif du Syndicat départemental d’énergies de la Manche (SDEM50).

Alliance entre le numérique et l’énergie, le micro-réseau (*microgrid*) permet la gestion de tous les flux d’énergie pour optimiser de façon continue la production d’énergies renouvelables :

- chauffage géothermique couplé au géocooling pour garantir le rafraîchissement lors des fortes températures ;

– système d'énergie photovoltaïque destiné à l'autoconsommation et complété d'une batterie de stockage.

Apportant un réel confort à ses usagers, ce bâtiment à énergie positive constitue aussi un outil pédagogique et de communication sur les compétences du syndicat.

Utilisés à bon escient, les outils numériques sont donc indispensables, et face à la raréfaction des ressources primaires, ils doivent aussi nous aider à penser et réaliser de nouveaux modèles du cadre bâti bien plus sobres en général.

3 Low tech et frugalité

Le bâtiment frugal s'affranchit du carcan des normes [11]. La frugalité permet une approche multidimensionnelle du bâtiment : à la fois humaine et sociale, participative et écologique, elle prône l'économie de ressources et s'affranchit du carcan des référentiels, explique Alain Bornarel [11], ingénieur au sein de Tribu, bureau d'études spécialisé dans l'approche développement durable des projets urbains et des bâtiments. Il s'est associé à deux autres professionnels reconnus de la construction, l'architecte-chercheuse Dominique Gauzin-Müller et l'architecte-urbaniste Philippe Madec pour rédiger le « Manifeste pour une frugalité heureuse et créative » qui défend une approche *low tech* avec la remise au goût du jour de savoir-faire ancestraux – ce qui ne signifie pas une absence de technologies, mais « le recours en priorité à des techniques pertinentes, adaptées, non polluantes ni gaspilleuses, comme à des appareils faciles à réparer, à recycler et à réemployer » [12]. Aux pratiques d'aménagement du territoire génériques et productivistes, destructrices des ressources naturelles, il est temps de restituer une réflexion de ménagement du vivant tenant compte de la spécificité de chaque situation.

Qu'elles soient innovantes ou non, les applications pour la production d'un bâtiment sobre et durable sont en effet toujours pleines de bon sens.

3.1 Habitat bio-inspiré et écosourcé

3.1.1 | Architecture biomimétique

Lors du salon Biomim'Expo d'octobre 2021 [13], Annick Girardin, alors ministre de la Mer, déclarait que « La nature a le meilleur programme politique qui soit ».

S'inspirer du vivant pour concevoir et construire n'est pas nouveau ; plusieurs types d'architecture à travers l'histoire reflètent en effet cette tendance :

- l'architecture vernaculaire, basée sur l'autoconstruction ;
- l'architecture japonaise, dans laquelle la nature contient une dimension spirituelle ;
- l'architecture solaire, qui utilise au maximum les apports solaires et la terre comme masse thermique ;

– l'architecture écologique, respectueuse de la nature et de la biodiversité ;

– l'architecture organique, réalisant l'intégration complète du bâtiment dans son environnement ;

– l'architecture biomorphique, enfin, influencée par la forme des animaux et des végétaux.

Cette approche en plein essor consiste donc à s'inspirer des formes, matières, propriétés, processus et fonctions du vivant pour penser, innover et agir autrement. Pour la France, elle est une filière d'excellence forte d'un exceptionnel réseau de compétences académiques et d'une capacité industrielle et entrepreneuriale de premier plan en recherche et innovation. L'architecture biomimétique est une philosophie contemporaine de la conception durable des bâtiments qui suit un ensemble de principes plutôt que des codes stylistiques, non pas en reproduisant les formes naturelles, mais en comprenant les règles qui régissent ces formes. Elle comprend trois niveaux d'inspiration :

– l'organisme : associé à une dimension de forme, il peut être imité dans son intégralité ou seulement en partie ;

– le comportement : associé à une dimension fonctionnelle, il est possible d'imiter un aspect du comportement ou l'ensemble du comportement et la relation avec le contexte ;

– l'écosystème : il s'agit d'imiter les interactions des espèces entre elles et le fonctionnement global des écosystèmes.

Les matériaux du vivant sont remarquables par leur diversité, leurs propriétés multifonctionnelles et leur manufacture par autoassemblage et autoréparation. De plus, les systèmes biologiques favorisent une approche minimaliste et une gestion optimisée de l'information pour à la fois limiter les coûts énergétiques et la consommation de ressources, et augmenter l'adaptabilité et la résilience.

Estelle Cruz, docteure en écologie et environnement, architecte-ingénieure et chargée de mission habitat bio-inspiré au Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis (Ceebios)⁽⁵⁾, préconise de penser les enveloppes des bâtiments comme les enveloppes multifonctionnelles des organismes vivants et invite les architectes à s'en inspirer. Cette idée a déjà été réalisée par le cabinet français XTU Architects sous la forme d'une biofaçade, composée de microalgues, fonctionnant sur le principe de panneaux solaires thermiques. Celle-ci est formée de trois couches de vitraux (fig. 2) au sein desquelles un filet d'eau s'écoule de façon à nourrir les algues photosynthétiques. Les prototypes installés depuis 2013 sur le toit de l'université de Saint-Nazaire sont présentés par leurs concepteurs Anouk Legendre et Nicolas Desmazières comme étant la symbiose entre architecture et technologie avec ces deux dimensions :

- une tour végétale ensauvagée par un travail sur la biodiversité où les arbres intègrent la façade ;

⁽⁵⁾ Le Ceebios est dédié à encourager le déploiement du biomimétisme en France.

– une tour biotechnologique où les procédés développés sont mis en scène pour réguler la température du bâtiment en toute saison et afficher un gain de 40 à 50 % d'économie d'énergie.



▲ Figure 2. Rendu 3D de photobioréacteurs (source : XTU Architects).

Autre exemple caractéristique du biomimétisme au service de l'architecture, la tour D2 du quartier Paris La Défense, conçue par l'agence Bechu & Associés, est une exostructure en acier offrant une grande flexibilité au projet ; elle minimise en effet l'importance du noyau au sein de la tour, libérant ainsi les plateaux d'un maximum de poteaux, et permet une construction très préfabriquée. Pour dessiner cette exostructure porteuse, les architectes se sont inspirés du périoste de l'os, dont la structure des fibres en maille participe mécaniquement à sa solidité et sa résistance. Composée de losanges verticaux, la structure maillée de D2 à l'image du vivant a permis de gagner 30 % de matière par rapport à une tour classique en béton de même gabarit. Et pour mieux profiter de la Voie lactée, sa coiffe habitée et accessible abrite le « Jardin des nuages », un jardin à ciel ouvert de 500 m² qui culmine à 170 m d'altitude.

Le biomimétisme, par la compréhension et l'imitation des systèmes vivants et en particulier des écosystèmes, est une opportunité inédite pour repenser le bâtiment. Soutenue par des outils numériques innovants, une stratégie bio-inspirée peut ainsi être employée pour l'accueil de la biodiversité, la gestion des flux ou encore une gestion efficace de l'énergie alliant la réduction de la consommation, l'augmentation de la réutilisation et l'optimisation du stockage.

3.1.2 | Emploi de matériaux biosourcés et géosourcés

À l'heure de la mise en application de la RE 2020, les matériaux biosourcés et géosourcés apparaissent de plus en plus comme un levier d'action indispensable de la décarbonation et de la transition du bâtiment, puisqu'ils procurent de nombreux avantages, notamment pour le stockage du carbone. Ils

participent également beaucoup au confort de l'utilisateur par leurs performances en termes de qualité de l'air, de qualité acoustique et d'ambiance sonore.

Revenons tout d'abord sur la définition et la différenciation de ces types de matériaux :

- les matériaux biosourcés sont partiellement ou totalement issus de la matière organique renouvelable (biomasse) d'origine végétale ou animale comme le bois, le chanvre, la paille, la ouate de cellulose, les textiles recyclés, les balles de céréales, le miscanthus, le liège, le lin, le chaume, l'herbe de prairie, le roseau ou la laine de mouton ;

- les matériaux géosourcés sont des matériaux d'origine minérale, dits « premiers », qui demandent peu de transformations. Il s'agit par exemple de la terre crue ou de la pierre sèche.

On peut tous les regrouper dans la famille des écomatériaux puisqu'ils répondent aux critères exigés tout au long de leur cycle de vie (de leur fabrication ou leur extraction jusqu'à leur élimination ou leur recyclage), qu'ils soient de nature technique (performance technique, qualité architecturale, normes de sécurité et de durabilité, résistance au feu ou à la chaleur, etc.), environnementale ou socio-environnementale.

Au-delà de l'aspect carbone sus-évoqué, les principaux atouts de l'emploi de ces matériaux sont, d'une part, l'utilisation simplifiée de ressources locales et le développement du réemploi pour construire et rénover différemment et, d'autre part, la réintroduction de savoir-faire locaux et transmissibles, favorisant l'estime des lieux que l'on habite.

En clin d'œil, signalons que le sens de l'acronyme BTP pour « bâtiment et travaux publics » évolue dorénavant en « bois terre paille ».

À ce jour, on peut distinguer trois filières principales en France (voir tableau 1).

Ces filières correspondent également à un gisement d'emplois locaux depuis la production des ressources jusqu'à la construction, en passant par la fabrication des produits. Il est important d'accélérer et de coordonner leur montée en puissance en faisant valoir l'exemplarité française. Agriculteurs et architectes s'ignorent encore, mais ils devront apprendre à se connaître pour développer l'usage des ressources biosourcées locales. Il existe en effet sur ce sujet une réelle opportunité de réduire les fossés créés entre ruralité et urbanité en ouvrant des espaces de collaboration et de partenariat.

Karibati, jeune entreprise innovante, accompagne l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur du bâtiment biosourcé au travers de prestations d'expertise :

- bâtiment : intégration des produits dans les opérations de construction et de rénovation ;
- matériaux : recherche et développement, mise sur le marché de nouveaux produits ;
- ressources : développement des filières locales.

Elle a mis en place un label « Produit Biosourcé » permettant de reconnaître les produits et de garantir leur teneur en biomasse.

▲ Tab. 1. Principales filières de matériaux écosourcés en France.

Filières	Maturité	Utilisations	Atouts
Bois	++	<ul style="list-style-type: none"> – Structure porteuse – Bardage – Revêtement de sols 	<ul style="list-style-type: none"> – L'importante couverture forestière nationale entraîne la nécessité d'une exploitation vertueuse – Un faible impact environnemental est permis grâce à un bilan carbone négatif et une récolte peu polluante, durable et recyclable ; le bois nécessite moins d'énergie que les autres matériaux pour sa transformation et contribue même au stockage de CO₂, agissant comme un puits de carbone pendant toute sa durée de vie – Grâce à sa grande légèreté, le bois est d'une longueur de rupture élevée pouvant résister à son propre poids et son utilisation dans la construction requiert peu de supports
Paille	+ Démarche du Réseau France construction paille (RFCP)	<ul style="list-style-type: none"> – Isolant – Support d'enduit – Structure porteuse (parfois) 	<ul style="list-style-type: none"> – La France en est le premier producteur européen et cette ressource est largement disponible – Seuls 10 % de la production sont nécessaires pour isoler 500 000 logements par an [14] – Matériau très écologique, la paille est tout aussi renouvelable que recyclable ou biodégradable – FDES = – 1,4 kg de carbone par m² de façade [14]
Isolants divers, dont mortiers et bétons biosourcés	+ –	<ul style="list-style-type: none"> – Isolation thermique par l'extérieur (ITE) et par l'intérieur (ITI) – Enduit 	<ul style="list-style-type: none"> • La production locale est diversifiée suivant la géographie, le climat et les besoins • Leur légèreté permet de réduire le poids de l'isolation et offre d'excellentes propriétés thermiques et acoustiques • Le chanvre, par exemple, représente 50 % de la production européenne et présente de nombreux avantages : <ul style="list-style-type: none"> – il ne nécessite pas d'intrant (engrais, arrosage), évitant ainsi les polluants et l'usage excessif de l'eau – ses racines profondes entraînent un gain de rendement, car elles peuvent ainsi puiser les nutriments dont la plante a besoin dans la terre et les nappes phréatiques – il possède d'excellentes performances hygrothermiques procurant davantage de confort, de bien-être et de santé aux usagers – sa durée de vie peut excéder 100 ans

Les matériaux écosourcés rassemblent tous les critères pour répondre aux enjeux d'intérêt général tels que la préservation des ressources ou encore la diminution significative des émissions de GES. Ils sont en outre produits avec une énergie gratuite : le soleil ; leur coût est par conséquent moins dépendant de celui de l'énergie liée aux combustibles fossiles. Dans les années à venir, l'utilisation de ces matériaux en plus forte proportion limitera sensiblement l'augmentation des coûts de construction, ce qui présente un réel potentiel de développement pour l'avenir.

Mais pour qu'ils soient mis en œuvre à grande échelle et de façon plus systématique en vue de répondre à la prise de conscience des investisseurs immobiliers et à l'engouement des citoyens, la filière doit pouvoir s'appuyer sur des plateformes numériques d'information et de ressources spécialisées sur des thématiques ciblées de l'écoconstruction et de l'innovation dans le bâtiment.

Depuis plusieurs années, BioBuild Concept, agence novatrice dans la construction écodurable, produit et met à disposition des acteurs un portail des matériaux biosourcés et des solutions constructives associées baptisé « Végétal(e) » [15]. Des milliers de données sont recueillies et un travail d'identification, de traitement et de classement des informations est réalisé en continu, chaque rubrique disposant d'un moteur de recherche spécifique :

- actualités : actualités récentes et passées traitant des matériaux et constructions biosourcés ;
- annuaire : acteurs des matériaux et des constructions biosourcés ;
- bibliothèque, librairie : documents de tous formats traitant des matériaux et constructions biosourcés ;
- événements : calendrier des événements impliquant les matériaux et constructions biosourcés ;

- formations : formations incluant l'utilisation des matériaux biosourcés ;
- produits : produits et matériaux de construction biosourcés ;
- réalisations : constructions et rénovations biosourcées significatives ;
- sites à visiter : autres sites Internet remarquables de la filière des matériaux et de la construction biosourcés.

Gageons que toutes ces initiatives et celles à venir accéléreront le développement d'un bâtiment plus sobre et plus durable. Cela passe non seulement par la démocratisation des techniques d'écoconstruction et par la libération des processus de normalisation des matériaux écosourcés, mais également par le développement d'une politique volontariste favorisant la passation des techniques et savoir-faire des artisans.

3.2 Rénovation et réhabilitation en *low tech*

3.2.1 Démarche EnergieSprong

Initiée aux Pays-Bas en 2013, la démarche dynamique européenne EnergieSprong propose un standard de rénovation ambitieux (zéro énergie garantie sur 30 ans) basé sur une logique de préfabrication et d'industrialisation. Son objectif est d'accélérer et de massifier les opérations de rénovation énergétique très performante. Elle est déployée en France depuis 2016 par une équipe dédiée de la société GreenFlex.

Avec pour premiers objectifs la qualité de vie et le confort des occupants, chaque projet de rénovation de logements sociaux comprend deux étapes : la mise en œuvre d'un démonstrateur puis le déploiement à plus grande échelle avec une démarche collective des parties prenantes.

L'objectif est d'opérer un véritable changement d'échelle et d'ambition de la rénovation énergétique, dans le logement et le bâtiment plus globalement, en alignant les intérêts de tous les acteurs de l'écosystème (pouvoirs publics, financeurs, bailleurs sociaux et entreprises). Pour cela, cette démarche propose un

cahier des charges exigeant, orienté sur la performance et les résultats plutôt que sur les moyens (fig. 3).

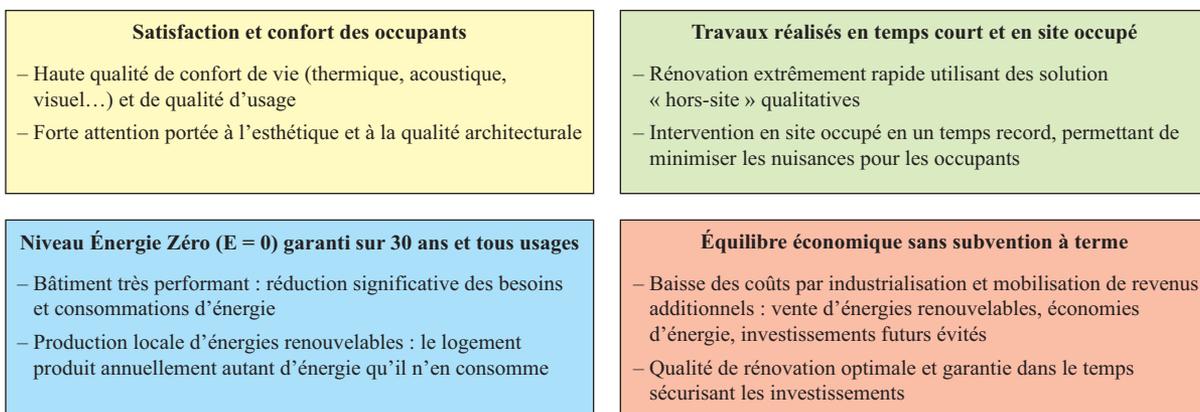
Inès du Ché, cheffe de projet Efficacité énergétique chez GreenFlex, insiste sur l'engagement des mainteneurs à piloter les logements à tout moment ainsi que sur l'accompagnement des occupants par des actions visant à les sensibiliser sur leur comportement, mais aussi à les autonomiser puisqu'ils « ont la main sur leur consommation ». Ainsi protégés de la précarité énergétique, il en résulte une fierté d'appartenance tout aussi importante pour la pérennité du lieu que la justification annuelle du « zéro énergie » (E=0) apportée par l'exploitant.

Pour apporter la visibilité sur l'état du marché, notamment les niveaux de prix et la maturité des solutions, un premier baromètre de l'observatoire Coûts, qualité et impact des rénovations EnergieSprong [16] dresse un bilan à mi-2021 des bénéfices et des progrès de ces rénovations à zéro énergie garantie déployées en France depuis quelques années. Cet outil de mesure favorise l'amélioration continue et collective des pratiques de rénovation :

- en suivant, analysant et partageant avec tout l'écosystème l'état actuel des connaissances et des pratiques du marché ;
- en analysant et communiquant sur la performance réelle des rénovations EnergieSprong en termes de coûts et de qualité, et en qualifiant l'impact de ces rénovations sur les plans économiques, sociaux et environnementaux ;
- en identifiant les facteurs de progrès et en établissant des trajectoires en termes de réduction des coûts et de l'impact environnemental.

Sur 110 opérations réalisées représentant environ 6 000 logements, les bénéfices mesurés sont les suivants :

- 12 000 tonnes équivalent CO₂ économisées sur l'usage à travers les projets activés, soit – 75 % ;
- 1 million d'euros économisés par le système de soins grâce à la disparition de la précarité énergétique, dont 880 000 € pour la Sécurité sociale ;
- près de 4 000 emplois créés, directs et indirects, grâce aux 110 projets.



▲ Fig. 3. Tableau récapitulatif des performances attendues (source : cahier des charges EnergieSprong).

Pour mettre en perspective les bénéfices de ces rénovations, elles sont à chaque fois comparées à trois autres scénarios de gestion du patrimoine :

- entretien et rénovation *a minima* ;
- rénovation au niveau « bâtiment basse consommation » (BBC) ;
- démolition et reconstruction neuve.

L'objectif est d'aider à arbitrer, dans une logique de coûts/bénéfices, la part d'un patrimoine qu'il fait sens de rénover avec le niveau d'ambition d'EnergieSprong.

Au-delà d'un niveau de performance exemplaire, la démarche s'appuie sur de nouvelles façons de concevoir et rénover, permettant d'en diminuer les coûts et d'en augmenter la qualité. *Open source*, elle s'inscrit dans une dynamique de progression collective alignant les intérêts de l'ensemble des acteurs de l'écosystème.

3.3 Sobriété énergétique et réduction de l'empreinte carbone

3.3.1 | Geosophy

Geosophy, société fondée en 2018 et présidée par Alice Chougnnet, physicienne de formation, a adopté le principe de la géoénergie qui joue sur l'inertie du sous-sol, dont la

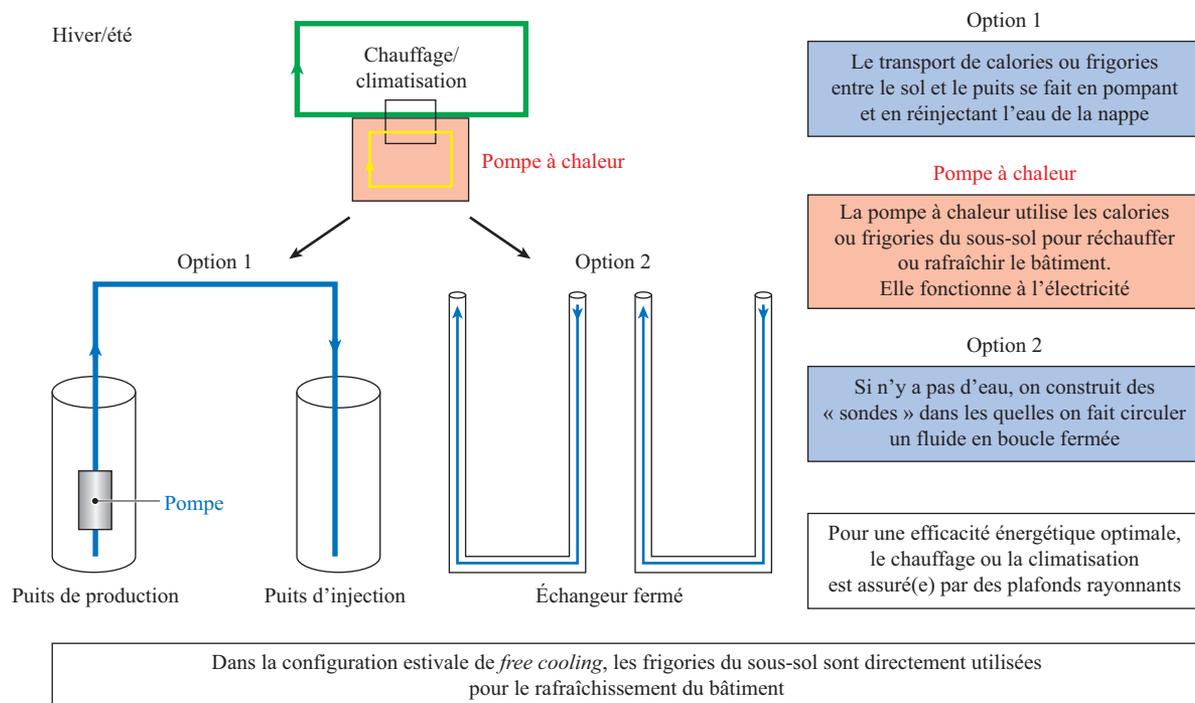
température reste constante et sans variation saisonnière. Elle consiste à aller puiser dans le sol, sous terre, la fraîcheur en été ou la chaleur en hiver. Proche du principe de la géothermie profonde, elle est néanmoins plus vertueuse car elle utilise la propriété du sous-sol de conserver une température constante d'environ 12-15 °C toute l'année, en dessous d'une profondeur de 5 m et jusqu'à quelques dizaines de mètres. Là aussi, l'observation des espèces naturelles est réaffirmée par Alice Chougnnet, qui aime à rappeler l'image des terriers constitués par certains animaux afin de demeurer au frais l'été et plus au chaud l'hiver.

Les schémas de la figure 4 présentent le système de circulation de l'eau à la température du sous-sol pour réchauffer ou rafraîchir un bâtiment à l'aide ou non d'une pompe à chaleur.

- Le préchauffage ou pré-rafraîchissement gratuit permet ainsi :
- de diviser par 10 les factures de chauffage et de climatisation des entreprises, foncières ou bailleurs sociaux ;
 - de diviser leur consommation énergétique par 4 ou 5 ;
 - de réduire l'empreinte carbone d'un bâtiment jusqu'à 90 %.

Geosophy a breveté une plateforme *SaaS* qui met à disposition un moteur de recherche à partir d'une adresse web [17] et permet de réaliser :

- un diagnostic numérique pour déterminer de façon fiable quelles sont les caractéristiques du sous-sol. L'analyse s'effectue à partir du croisement des données BRGM⁽⁶⁾ du jumeau numérique du sous-sol français (couches, propriétés, eau),



▲ Fig. 4. Installations de géoénergie (source : Geosophy).

(6) Données du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

véritable « GPS du sous-sol », et de celles de la base IGN⁽⁷⁾ des surfaces et emprises du bâtiment et de sa parcelle ;

- le calcul des besoins du bâtiment sur une année (apports solaires...) et la possibilité de forer avec la recherche de réponses à des questions simples et pragmatiques :

- Qu'est-ce qui est pris au sol ?
- Qu'est-ce qui est remis dans le sol ?
- Qu'est-ce qui est régénéré naturellement par le sol ?

- le calcul prédictif des coûts d'investissement d'une installation, des revenus énergétiques ainsi que la valorisation immobilière (valeur verte) des installations géoénergétiques de l'actif dans la perspective du décret tertiaire.

En accompagnant ses clients comme AMO ultrasécialisé pour passer de l'opportunité à la faisabilité puis au suivi d'exploitation avec une approche systémique du projet (bâtiment, alentours et sous-sol), Geosophy garantit le retour sur investissement d'un tel projet et assure sa durabilité sur les axes suivants :

- décarbonation ;
- autonomie énergétique ;
- confort augmentant la valorisation du bien ;
- adaptation au dérèglement climatique en permettant le rafraîchissement lors des étés caniculaires.

Cette offre globale et innovante a déjà convaincu des foncières référentes du marché telles que Covéa Immobilier, Gecina ou Allianz, ainsi que de grands utilisateurs propriétaires de patrimoines immobiliers comme la Caisse des dépôts et consignations et la SNCF. Elle a été distinguée par les premiers trophées Worknight [18] dans la catégorie « Exploitation durable », par un jury de directeurs immobiliers, d'architectes, de promoteurs et de professionnels de l'énergie. Geosophy a aussi été sélectionnée dans l'appel à projets du programme d'investissements d'avenir (PIA) « France 2030 », qui prévoit notamment l'extension à l'international de sa plateforme.

REMARQUE

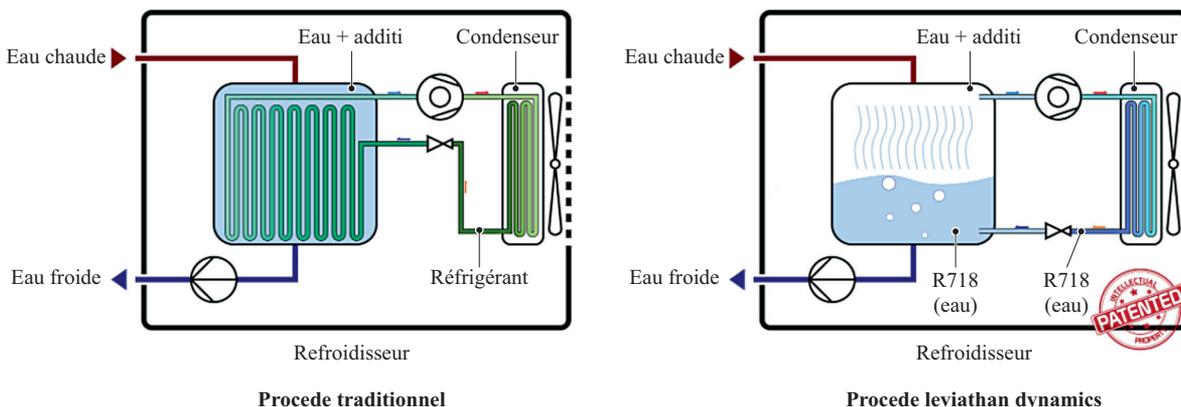
La géoénergie peut également servir de vecteur de stockage du solaire thermique. Ce procédé permet en effet de capter en toiture pendant l'été la chaleur du soleil et de la diriger vers le sol qui, grâce à son inertie, peut servir de réservoir pour l'hiver suivant.

3.3.2 | Leviathan Dynamics

Fondée en 2016, Leviathan Dynamics⁽⁸⁾ est une start-up industrielle française experte dans la compression dont les ingénieurs ont mis au point un procédé innovant permettant de produire du chaud et du froid dans les bâtiments en éliminant tous les gaz fluorés extrêmement nocifs pour l'environnement. Son président, Naoufel Ménadi, détaille un système thermodynamique de compression mécanique de vapeur (CMV) utilisant exclusivement l'eau comme réfrigérant (climatisation) ou pour chauffer sobrement en énergie, limitant fortement l'empreinte carbone. Pour proposer une offre encore plus vertueuse, la réflexion globale a été menée sur l'ensemble de la chaîne de valeur : conception, fabrication de certains composants en atelier et assemblage.

Dans les groupes froids et les pompes à chaleur traditionnels, parce que les réfrigérants sont polluants et/ou dangereux, le cycle de réfrigération est toujours fermé au sein de la machine afin de limiter la quantité de réfrigérant utilisée. Pour permettre les transferts de chaleur du procédé vers la machine, un circuit de caloporteur est utilisé.

Avec la technologie développée par Leviathan Dynamics, le caloporteur et la réfrigération sont le même fluide : l'eau (fig. 5). Ceci est rendu possible car l'eau n'est ni polluante, ni dangereuse. Dans un tel cas, l'échangeur de chaleur qui sépare le circuit de réfrigération et le circuit de caloporteur n'est pas nécessaire. En supprimant cet échangeur, il est alors possible



▲ Fig. 5. Schémas de procédés comparatifs (source : Leviathan Dynamics).

(7) Base de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

(8) Leviathan Dynamics est l'une des trois premières start-ups dont le développement industriel et commercial est soutenu par Time for the Planet.

d'atteindre une efficacité énergétique plus élevée puisque l'échangeur de chaleur est une source d'inefficacité.

La contribution à la sobriété énergétique du bâtiment passe aussi par le rallongement du cycle de l'eau grâce au mode de circularité (par exemple la récupération de chaleur) et à l'application du juste confort thermique (absence de surdimensionnement par rapport à l'usage).

3.3.3 | Plan local d'urbanisme bioclimatique de la Ville de Paris

À Paris, le secteur du bâtiment représente 80 % des consommations d'énergie du territoire et 20 % des émissions de GES. Pour cette raison, la transformation de ce secteur impliquant notamment l'utilisation de matériaux biosourcés constitue l'un des axes du PLU bioclimatique de la Ville de Paris en vue de fixer des exigences au bénéfice de tous.

Dans l'une des « capsules » vidéo diffusée par le Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement (CAUE) de Paris [19], Delphine Paillard, architecte cheffe de projet à la Passerelle Transition écologique de la Direction des constructions publiques et de l'architecture (DCPA) de la Ville de Paris, explique qu'une construction décarbonée est un bâtiment construit avec des matériaux naturels, produits localement et dont la fabrication ou le recyclage émettent peu de carbone et pas de composés organiques volatils (COV). Cette pratique participe à la qualité de l'air de l'immeuble par ses vertus de *perspiration* favorisant l'évacuation de l'humidité d'une paroi sous forme liquide ou de vapeur, et de *déphasage* qui correspond à la capacité dans le temps des matériaux à ne pas laisser passer la chaleur. En raison des pics de chaleur estivaux passés ou à venir, les services de la Ville de Paris sont particulièrement intéressés par ce phénomène pour améliorer le confort d'été de son patrimoine immobilier.

3.4 | Économie de la fonctionnalité

3.4.1 | Intensifier les usages

Dans l'excellent livre *Réparons la ville !* [20], après avoir rappelé les principaux enjeux de notre siècle pour tenter de dépasser les crises liées au climat, aux ressources limitées de la planète et à la perte de biodiversité, Christine Leconte, présidente du CNOA depuis juin 2021, et Sylvain Grisot, urbaniste et fondateur de dixit.net⁽⁹⁾, amènent leurs lecteurs à constater que la ville du futur est déjà là et qu'il va falloir la transformer par de petites opérations cousues main, attentives au détail et en circuit court. Cela passe par une nouvelle façon de penser le bâtiment, plus malléable et évolutif, priorisant la qualité à la

(9) Dixit.net est une agence de conseil et de recherche urbaine créée en 2015, résolument engagée pour les transitions de la fabrique de la ville.

quantité afin de donner envie d'y vivre. Des propositions sont alors faites pour soutenir un urbanisme de partage et une vraie politique de l'habitat dans lesquels sont pris en compte l'environnement, le cadre de vie, les mobilités, les espaces publics, la proximité avec les services et les loisirs, ainsi que la relation avec la nature ; ces propositions consistent à :

- diversifier les formes urbaines et les typologies d'habitat permettant de bien vivre dans la ville dense ;
- améliorer la qualité des logements (taille, hauteur, luminosité, espaces extérieurs) et leur relation à la ville ;
- faire évoluer les modes de financement pour que le logement ne soit plus un produit économique comme un autre ;
- intégrer systématiquement le partage d'espaces dans des opérations pensées par leurs habitants ;
- multiplier les innovations en termes de financement et de montage opérationnel pour massifier l'offre de logements sociaux et abordables.

Les bâtiments ne resteront pas dans une seule dynamique d'usage.

3.4.2 | Concept HOME et méthode BOB de Pascal Gontier

Imaginé et mis au point par l'architecte Pascal Gontier, l'habitat ouvert et sur mesure (HOME) est un nouveau modèle de logement collectif :

- capable d'offrir à ses habitants des logements adaptés à leurs besoins et à leurs désirs, et dotés de façades fortement personnalisées ;
- interrogeant non seulement les modes de conception, mais aussi le rôle de l'architecte dans la société ;
- impliquant les futurs habitants, sans être un habitat participatif ;
- adapté aux évolutions.

Invité à présenter ce concept lors de la conférence mensuelle organisée par l'Iceb Café en mars 2022 [21], Pascal Gontier expliquait qu'il s'appuie sur la méthode *Bespoke Open Building* (BOB) et le logiciel BOB Tailor (signifiant « tailleur de bâtiment ouvert sur mesure ») pour organiser deux entités distinctes, l'architecture primaire et l'architecture secondaire, ainsi qu'un dispositif de régulation permettant la création de façades sur mesure.

L'architecture primaire constitue l'entité collective et pérenne du bâtiment ; elle comprend la structure primaire, les parties communes et les gaines. L'architecture secondaire, quant à elle, est un ensemble pluriel composé de la somme des parties privatives, avec leurs différentes façades et leurs prolongements extérieurs. C'est cet ensemble qui est visible depuis l'extérieur.

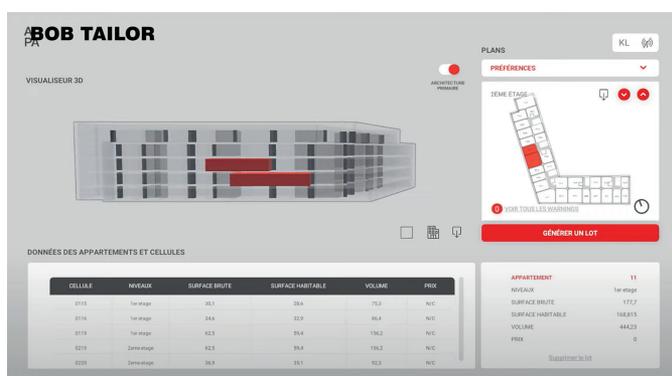
Les logements sur mesure sont créés à partir d'un double processus :

- la formation des entités domestiques à partir de l'addition horizontale ou verticale de différents lots ;
- l'agencement de chacune de ces entités.

Le dispositif de régulation de la peau extérieure permet à chacun des habitants de bénéficier du maximum de liberté pour créer la façade de son logement, avec ses balcons, ses loggias ou les vérandas qui s’y rapportent, dans un cadre qui préserve les droits des voisins. Il est composé de deux outils complémentaires :

- les règles de composition, qui traitent des questions d’ensoleillement, de vues et d’intimité ;
- la bibliothèque des éléments de façade, qui vise à la rationalité des façades et de leurs prolongements ainsi qu’à l’harmonie générale du bâtiment.

Finement réfléchi en amont, cet outil apporte simultanément la rigueur nécessaire du cadrage de la conception et la souplesse des solutions permises aux habitants, visant à faire naître un bâtiment à leur image (fig. 6).



▲ Fig. 6. Capture d’écran du logiciel BOB Tailor (source : Atelier Pascal Gontier).

Si les *low techs* sont une voie de solution à la sobriété, celle-ci doit cependant être systémique en écartant les modèles obsolètes et en soutenant une économie nouvelle fondée sur l’usage et la fonctionnalité. Ainsi, l’intelligence artificielle peut contribuer à la sobriété par le biais notamment de la réduction de la consommation des ressources, de l’inclusion et de l’analyse des usages. L’innovation dans les technologies visant la sobriété tout en améliorant le confort et le bien-être constitue un outil indispensable pour atteindre la neutralité carbone. Des stratégies publiques doivent alors être mises en place pour favoriser leur émergence et les soutenir.

4 Approche territoriale : l’exemple des Hauts-de-France

Premier territoire passif en termes de mètres carrés bâtis [22], la région Hauts-de-France offre un panel complet de solutions innovantes soutenues par un dynamisme exemplaire et une complémentarité des structures locales publiques et privées.

4.1 Centre de développement des éco-entreprises

4.1.1 Clause verte

Constatant un manque de contenu opérationnel des clauses environnementales dans les cahiers des charges, le Centre de développement des éco-entreprises (CD2E), dans son rôle de soutien et de conseil aux entreprises et aux territoires en Hauts-de-France, a lancé fin 2020 la « clause verte » afin de mettre à disposition des pouvoirs adjudicateurs des clauses de développement durable à intégrer dans les marchés publics. D’après Michaël Surelle, responsable Achat public durable du CD2E, plus de 200 clauses sont disponibles à ce jour, majoritairement autour des sujets de la transition énergétique (bâtiment, énergie). Elles sont accessibles gratuitement et sans inscription sur une plateforme numérique simple et ergonomique [23], fruit d’un travail de collaboration avec les acheteurs publics locaux.

Facilitant le partage d’expériences, la clause verte est l’un des outils du nouveau Plan national pour des achats durables (PNAD 2022-2025) publié en mars 2022 [24]. Avec cette nouvelle feuille de route, l’État veut développer massivement l’achat public durable en généralisant les considérations environnementales et sociales. Il s’agit d’un véritable plan de bataille pour atteindre les objectifs de la loi *Climat et résilience* et accompagner les acheteurs publics dans la transition écologique de la commande publique.

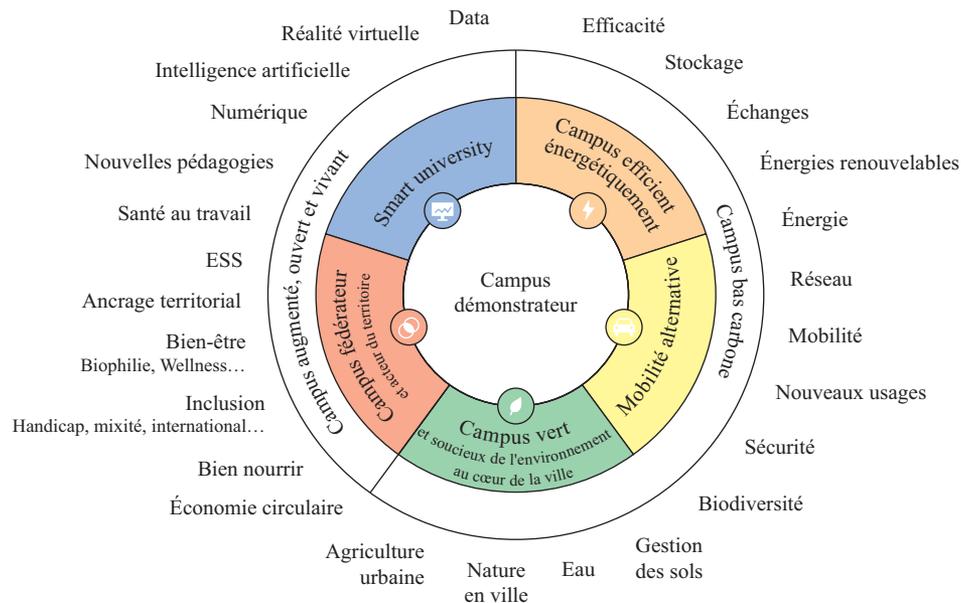
Cet outil s’accompagne de la création de réseaux régionaux d’ambassadeurs de la clause verte qui ont pour mission de mobiliser les énergies et de donner du sens à la fonction d’achat durable. C’est ainsi que le CD2E collabore aux côtés du Centre de ressource du développement durable (CERDD) et d’autres structures publiques pour organiser ce guichet de facilitateur environnemental.

La dernière version de la clause verte parue en juin 2022 intègre la dimension sociale, le cycle de vie et les critères d’attribution, et améliore le moteur de recherche permettant de filtrer les résultats avec des explications associées à chaque clause en fonction des différents horizons des contributeurs (État, collectivités, bailleurs sociaux, associations...). Une charte et des kits de communication favorisent le partage de bonnes pratiques entre tous les acheteurs soumis au Code de la commande publique.

Notons que la clause verte génère directement une augmentation de performance du bâti.

4.1.2 Programme Vertuoze

Parmi ses rôles de support, le CD2E est également animateur du programme Vertuoze financé par la Métropole européenne de Lille (MEL). Rémi Montorio, expert BIM de la MEL, présente ce programme ainsi : « le Club Vertuoze fédère un réseau d’acteurs locaux des filières conception et construction pour promouvoir l’usage du BIM et le développement de



▲ Fig. 7. Cibles du campus démonstrateur (source : Junia).

programmes de bâtiments intelligents. Lieu de rencontre et de partage de retours d'expérience, c'est aussi un espace d'accompagnement de toute la chaîne de valeur dans la conduite du changement pour faire comprendre les évolutions de pratiques en fonction des usages, avec toujours en ligne de mire la recherche d'une sobriété éclairée de la donnée ».

Dans le cadre des « Rendez-Vous Vertuoze », le CD2E accompagne le déploiement du label R2S dans les Hauts-de-France ainsi que tout type de projets de bâtiments connectés et communicants. C'est aussi le lieu du rapprochement avec EnergieSprong et la volonté de la région de créer une vraie filière de la construction et de la rénovation hors site.

4.1.3 | Partenariat EnergieSprong

Nicolas Guezel, responsable Pôle bâtiment durable du CD2E explique qu'avec la région Hauts-de-France, une action collective autour de la démarche EnergieSprong est engagée pour favoriser l'appropriation de l'écosystème local au dispositif. Très dynamique, le réseau d'environ 150 entreprises (BET, énergéticiens, majors du bâtiment, TPE, PME, industriels) qui s'est constitué s'inspire d'autres clubs lancés dans d'autres régions, et s'appuie notamment sur une demande en hausse des bailleurs au travers du Groupement interbailleurs pour la rénovation E=0 (GIRéØ)⁽¹⁰⁾ et de quelques collectivités.

(10) GIRéØ est un groupement créé le 18 juin 2021 afin de concrétiser l'engagement des bailleurs en faveur de la transition du parc et des usages de la construction. Il réunit sept bailleurs, accompagnés par l'Union régionale pour l'habitat (URH) Hauts-de-France.

4.2 | Chaires de recherche Junia

4.2.1 | Expérimentations « smart »

La MEL finance aussi des chaires de recherche telles que Yncréa Hauts-de-France, devenue Junia, grande école d'ingénieurs dans laquelle Grégory Vangrevening, responsable technique démonstrateur, teste sur les bâtiments du campus de l'école, en mesure réelle, des projets de *smart grids*, de *smart buildings*, de maison connectée (accompagnement au vieillissement) et d'agriculture urbaine. En mixant *high tech* et *low tech* où l'utilisateur devient acteur du bâtiment, des interactions s'installent entre le bâtiment et l'occupant en vue de son confort et son bien-être (qualité d'air, température, éclairage) et entre le bâtiment et son environnement extérieur (fig. 7).

4.2.2 | Chaire industrielle SBnodesSG

Au cœur de l'Université catholique de Lille, Junia et dix acteurs du monde économique ont lancé, avec le soutien de la MEL, la chaire industrielle SBnodesSG (*Smart Buildings as nodes of Smart Grids*), dont la vocation est d'améliorer le confort des usagers et l'efficacité énergétique en intégrant les objets connectés et le *big data* dans la gestion intelligente des bâtiments et réseaux d'énergie.

Ce projet se distingue par le fait d'associer un panel d'entreprises de toutes tailles (très grandes entreprises, PME et start-ups) au monde académique afin de créer un lien fort permettant de renforcer la performance globale.

4.3 Teia, hyperviseur BIM Exploitation édité par Stereograph

Parmi ces acteurs, l'entreprise Stereograph, éditeur du logiciel 3D *Teia*, hyperviseur BIM Exploitation⁽¹¹⁾, a enrichi sa solution en fluidifiant l'accès à la donnée patrimoniale dynamique en *full web* et en augmentant sa traçabilité, fer de lance de son président, Manuel Gomes, pour qui « La réduction sensible de la non-qualité est un levier pour répondre aux exigences des normes écologiques de plus en plus fortes tout en réduisant les coûts ». Il met aussi l'accent sur l'importance du collaboratif dans une démarche BIM en termes d'échanges entre les partenaires d'un projet et sur la transformation des *process* et l'accompagnement dans les changements de comportement avec des outils de sensibilisation des occupants. Pour lui, le processus mis en place pour atteindre les objectifs attendus passe par quatre étapes :

1. Créer : création du jumeau numérique ;
2. Gérer : traçabilité et suivi de la qualité pour la maîtrise de l'environnement technique et fonctionnel de la maintenance au quotidien ;
3. Exploiter : hypervision par la mise à disposition de l'information patrimoniale à l'ensemble des parties prenantes (accès sécurisés selon des profils utilisateurs dédiés) ;
4. Valoriser : création de valeur ajoutée au travers de tableaux de bord (*dashboards*) permettant de vérifier par exemple si le bâtiment est vertueux (recyclabilité, empreinte carbone, consommation énergétique, qualité d'usage, etc.).

Aujourd'hui, Stereograph engage une partie de ses ressources en recherche et développement sur la *blockchain* afin de créer de la valeur sur la propriété de l'immeuble et sur l'*asset* digital. Cette démarche présente l'avantage de conserver le lien entre monde réel et monde virtuel, l'offre garantissant que le jumeau numérique est en permanence conforme à la réalité : le conteneur est frappé du NFT, mais le contenant est mouvant. Cet apport de valeur permet de financer les transitions énergétique, écologique et sociale incontournables du bâtiment.

4.4 Unité « Bâtiments intelligents » de Pouchain

Utilisatrice du logiciel *Teia*, Pouchain est une société ancrée depuis 1890 dans le Nord. Son ADN a toujours été l'accompagnement de ses clients exploitants dans la performance énergétique de leurs actifs, en *process* industriel ou en immobilier tertiaire. Sa réorganisation passe par la création en 2021 de l'unité « Bâtiments intelligents » afin d'offrir une meilleure visibilité de son offre d'expertise technique, plus intégrée et

(11) *Le BIM Exploitation est un processus qui permet de centraliser, sur une même plateforme, l'ensemble des données du bâtiment portées par une maquette numérique intégrant des données relatives aux produits installés et destinée à un ou des usages en phase exploitation [25].*

globale. À la tête de ce service, Kévin Clément privilégie les modèles prédictifs par l'exploitation accrue de la donnée contextualisée (*smart data*) en déclinant les engagements en matière de responsabilité sociétale des entreprises (RSE) par usage, pour un gain de confort et de flexibilité dans l'évolution fonctionnelle des bâtiments.

Un an seulement après sa création, la nouvelle unité de Pouchain a acquis une notoriété régionale d'intégrateur : « nous sommes contactés en direct par de grands acteurs du bâtiment (Vinci, Sogéa, Projex...) pour collaborer », déclare ainsi Yannick Duplat, responsable d'affaires Régulation *Smart building*, qui cite en référence le projet pilote EnergieSprong de rénovation énergétique de 160 logements du quartier Beaulieu à Wattrelos dans le Nord, opération réalisée au travers d'un marché global de performance (MGP) en conception, réalisation, exploitation et maintenance (Crem) sur 25 ans. Pouchain y réalise, pour le compte du groupe privé d'immobilier social Vilogia, l'installation du module énergie composé d'un générateur photovoltaïque et d'un système de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire (pompe à chaleur) ainsi que l'instrumentation nécessaire au suivi de la performance énergétique. Pouchain assurera aussi pendant toute la durée du Crem la garantie de performance E=0 et la maintenance complète des équipements installés.

À son actif également, l'intégration *smart building* du bâtiment HEI du campus Junia, avec l'objectif de développer un immobilier exemplaire au titre des enjeux de la ville et de la transition énergétique et sociétale.

Avec un engagement croissant de tous ses acteurs et des projets toujours plus ambitieux au service de ses habitants, le territoire des Hauts-de-France développe toutes les composantes du *smart building*.

5 Conclusion

Offrir au bâtiment les qualités de durabilité et d'amabilité, c'est avant tout répondre à des exigences diverses et spécifiques en fonction de sa localisation, de l'histoire du lieu, du programme, des besoins et des envies de ses occupants, et des usages induits. Pour cela, il faut une réflexion et des ambitions collectives et partagées.

5.1 Assistance à maîtrise d'usage (AMU) du bâtiment

Architecte et urbaniste, Patrick Bouchain, grand prix de l'urbanisme 2019, pratique avec l'agence Construire [26], qu'il a fondée en 1986, une architecture « haute qualité humaine » (HQH) dans laquelle le projet doit prendre en compte les attentes et savoirs des usagers, en plaçant aux côtés de la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre une troisième notion : la « maîtrise d'usage ».

Marchant sur ses pas, l'AMU du bâtiment se développe depuis près d'une décennie afin d'intervenir en amont à la définition, à la préfiguration et à la conception du projet bâti, qu'il soit en neuf ou en réhabilitation. L'AMU propose ainsi de faire participer non seulement les usagers aux projets urbains en accueillant leurs propositions, mais d'intégrer également l'ensemble des parties prenantes en partageant des expériences et des connaissances au service de l'innovation méthodologique et organisationnelle, tout en assurant un modèle économique vertueux.

Avec la réflexion sur les futurs usages, voire les évolutions d'usages possibles d'un bâtiment, l'AMU favorise la constitution d'une organisation et d'une dynamique convergentes (réunissant producteurs, gestionnaires responsables et futurs usagers) en laissant libre cours, selon Alexis Durand Jeanson, chercheur associé de Prima Terra, l'École de l'entrepreneuriat territorial, aux idées « participant de la fabrication d'une culture et d'un état d'esprit communautaire, au sens d'un ensemble d'individus développant un sentiment d'appartenance commun et cherchant à pérenniser celui-ci par un système relationnel d'interdépendance » [27].

Pour Delphine Labbouz, docteure en psychologie sociale et environnementale, consultante indépendante, spécialiste de l'accompagnement des changements de comportements pour la transition écologique, la vision de l'AMU consiste avant tout à remettre l'humain et l'utilisateur au cœur du bâtiment, par l'attention qu'on lui apporte en écoutant ses besoins, ses attentes et ses envies. La démarche de co-construction doit s'engager au plus tôt, si possible dès la phase de programmation, afin d'éviter de potentielles dérives du projet. Il s'agit d'adopter une posture d'accompagnement des processus permettant l'autonomie et la montée en compétences des usagers en intégrant les dimensions humaine et sociale. Cela se traduit par des enquêtes de terrain, mais aussi par des « formations en marchant » pour créer le lien entre techniciens et futurs habitants, plus encore dans des bâtiments connectés : au moment de l'entrée dans les lieux, une visite des locaux techniques de l'immeuble est organisée, donnant à voir et à comprendre l'envers du décor.

Les effets positifs de l'assistance à maîtrise d'usage ont été analysés et décrits par le Réseau AMU⁽¹²⁾ dans un livre blanc [28] publié en 2020. Parmi ces effets, citons :

- l'appropriation par les usagers de leur bâtiment : ils prennent soin des locaux, leur perception de confort et de bien-être est augmentée (paramètres psychologiques) et ils ont la liberté d'agir et de décider avec une marge de manœuvre ;
- la création d'une dynamique de groupe et des liens sociaux : un sentiment d'appartenance à une communauté émerge, le dialogue est facilité et les conflits d'usage évités ;

(12) Créé à la fin de l'année 2013, le réseau AMU est aujourd'hui un groupement d'une vingtaine de professionnels partageant des expériences et des connaissances au service de l'innovation méthodologique et organisationnelle. Depuis le début de l'année 2022, il s'est constitué en association.

- la réalisation de gains économiques : ces gains sont soit quantifiables, par exemple en termes d'économie d'énergie, soit subjectifs, en évitant des coûts de réparation (réduction des dégradations) et de maintenance ;

- la valorisation des biens : elle se traduit par l'augmentation des performances du bâtiment et de sa valeur patrimoniale, par la présence d'espaces communs bien pensés et investis ainsi que par l'amélioration de la qualité de vie.

En accueillant les propositions des habitants et des usagers et en laissant l'initiative des idées à toutes les parties prenantes, l'assistance à maîtrise d'usage améliore l'acceptation collective et invite les innovations au profit de la qualité des projets.

5.2 Ambition d'une sobriété globale

Dominique Bourg, philosophe et professeur honoraire à l'université de Lausanne, définit la sobriété comme une auto-limitation individuelle et collective, et le meilleur moyen de réduire les inégalités. Au contraire du renoncement, voire de la punition, elle permet non seulement de retrouver des racines et du sens, mais aussi un épanouissement de fond que rien ne va venir gêner pour atteindre un idéal spirituel.

Malgré les bénéfices que les solutions connectées peuvent engendrer dans la gestion du bâtiment (économies de ressources, accroissement du confort et du bien-être des habitants, accès aux services, etc.), la problématique de l'impact environnemental du numérique prend une place croissante dans le débat. En effet, la comparaison des coûts et des bénéfices générés par ces solutions est délicate. Si les bénéfices sont plutôt bien identifiés, la mesure des coûts et de leur impact environnemental reste complexe et les organisations doivent structurer des méthodologies pour y parvenir. Les nouvelles technologies se réduisent donc dans la mise en œuvre des *smart buildings*, au profit d'une attention croissante aux parties prenantes du bâtiment et à sa co-construction. Le bâtiment intelligent représente alors une juste articulation et un équilibre subtil des *high techs* et des *low techs* qui permettent d'accroître la qualité de vie des habitants tout en préservant leur lieu de vie. L'approche technocentrée laisse place à la volonté de remettre l'humain au cœur des projets afin de répondre en premier lieu aux besoins des habitants. Nous retrouvons ici un principe de base de la sobriété. L'enjeu est de concilier l'intelligence collective, incarnée par les comportements de tous les acteurs, et l'intelligence artificielle, qui met le numérique au service d'un projet de bâtiment durable et désirable.

Pour être intelligent, le bâtiment de demain se doit d'être à la croisée de toutes les économies :

- une conception bioclimatique ingénieuse, avec un emploi raisonné de matériaux écosourcés et d'énergie permettant l'économie de ressources et la frugalité de sa construction ou de sa rénovation ;
- une démarche d'ouverture, dans laquelle la maîtrise d'usage des données génère le développement d'une économie de la

donnée basée à la fois sur l'*open data* et l'interopérabilité, et sur un écosystème numérique vertueux et respectueux des libertés individuelles ;

– « selon le modèle d'économie de la fonctionnalité, ce n'est désormais plus la propriété des biens qui est proposée mais son usage » [29]. L'Observatoire de l'immobilier durable (OID) avance même le concept de « chronotopie », qui consiste à alterner les fonctions d'un même espace suivant des heures de la journée, où des espaces de restauration se transforment par exemple en zones de *coworking*. L'impact de ces organisations sur la qualité du travail semble avoir été peu étudié, mais cette optimisation serait sans doute bénéfique aux occupants.

Par ailleurs, le bâtiment doit être conçu ou repensé comme un organisme vivant intégré, adapté à son milieu et capable de fournir des services écosystémiques comme accueillir la biodiversité, assurer une bonne qualité d'air, purifier et stocker les eaux de pluie ou convertir la lumière du soleil en énergie réutilisable. Cette conception régénérative tend à créer un habitat sain et à contribuer à l'équilibre du milieu, permettant notamment une optimisation de sa structure, de sa performance énergétique ainsi que des flux entrants et sortants. Enfin, cette conception doit encourager la transformation des modes de vie vers des comportements de consommation et des stratégies de production plus durables et résilients.

En ouvrant un espace de vie accessible, sain, modulable, accueillant et sûr, le *smart building*, plus respectueux de l'environnement mais aussi généreux dans ses espaces, installe l'usager (qu'il ait une occupation permanente ou temporaire des lieux) au cœur de son dispositif en lui offrant une expérience inspirante agrémentée de services flexibles et personnalisés. Il apparaît en outre comme un élément clé de la valorisation immobilière, reposant sur les trois piliers du développement durable : la vision environnementale, la partie sociale et enfin la dimension économique.

6 Références

[1] Livre blanc du BIM universel sous l'impulsion du maître d'ouvrage, ABD, janvier 2022.

[2] *Le BIS et le BOS – Les outils de la gouvernance des données du bâtiment – Livre blanc*, SBA, avril 2022, <https://marketing.smartbuildingsalliance.org/fr/livre-blanc-bis-bos-outils-gouvernance-donnees-batiment>.

[3] Interview du 30 mars 2022.

[4] « Construire et rénover, objectif zéro carbone », Journée de l'efficacité énergétique et environnementale du bâtiment, salon EnerJ-meeting, Paris, 31 mars 2022.

[5] Cf. la vidéo de démonstration du logiciel SustainEcho, www.youtube.com/watch?v=FbtY9UlX9b8.

[6] « Real IT 2021 : la réalité du numérique dans l'industrie immobilière », colloque Business Immo, Paris, 7 octobre 2021.

[7] Feuille de route gouvernementale « Numérique et environnement – Faisons converger les transitions », Ministère de la Transition écologique (MTE), 23 février 2021, www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/2021/Feuille_de_route_Numerique_Environnement_vremerciement1802.pdf. Les services du MTE et de la direction générale des Entreprises (DGE) ont la charge du pilotage de la mise en œuvre de la stratégie gouvernementale.

[8] Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d'actions de réduction de la consommation d'énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire, *JO* du 25 juillet 2019.

[9] Décret n° 2020-887 du 20 juillet 2020 relatif au système d'automatisation et de contrôle des bâtiments non résidentiels et à la régulation automatique de la chaleur, *JO* du 21 juillet 2020. Le décret *BACS (Building Automation and Control Systems)* porte sur la mise en place d'un système d'automatisation et de contrôle des sources de consommation d'énergie (chauffage, refroidissement, ventilation, production d'eau chaude sanitaire ou d'énergie renouvelable) pour les bâtiments non résidentiels.

[10] Interview du 28 avril 2021.

[11] Sinaï (Agnès), « Le bâtiment frugal s'affranchit du carcan des normes », Entretien avec Alain Bornarel, *Actu-Environnement.com*, 21 février 2018, www.actu-environnement.com/ae/news/le-batiment-frugal-s-affranchit-du-carcant-des-normes-30706.php4.

[12] Bornarel (Alain), Gauzin-Müller (Dominique), Madec (Philippe), « Manifeste pour une frugalité heureuse et créative », *Frugalité.org*, 18 janvier 2018, www.frugalite.org/fr/le-manifeste.html. Voir également « Des architectes lancent un manifeste pour la frugalité dans la construction », *Batiactu*, 22 janvier 2018, www.batiactu.com/edito/architectes-lancent-un-manifeste-frugalite-dans-construction-51809.php.

[13] Biomim'Expo (« Le grand rendez-vous du biomimétisme et des innovations bio-inspirées »), salon NewCorp Conseil, Paris, 19 octobre 2021.

[14] Rougelot (Benoît), architecte et co-président du RFCP, in « La rénovation énergétique dans les territoires », Table ronde des « Rendez-vous du mondial du bâtiment » animée par Nathalie Croisé, Paris, 6 mai 2022 ; cf. *Batiradio*, www.batiradio.com/les-rdv-du-mondial/utiliser-de-la-paille-pour-lisolation-thermique/.

[15] Cf. www.vegetal-e.com/fr/.

[16] Observatoire Coûts, qualité et impact des rénovations *EnergieSprong*, *Suivre et accompagner le déploiement des projets en France*, *EnergieSprong*, septembre 2021, www.energiesprong.fr/ressources/livret-ocqi-barometre-2021/.

[17] Cf. <https://app.geosophy.io>.

[18] « Worknight, la Nuit du Future of Work », Événement *Républik Workplace*, Paris, 21 mars 2022.

- [19] « Épisode 4 : la ville décarbonée », in « Capsules “C’est quoi un PLU bioclimatique ?” – 6 minutes pour décrypter le futur PLU parisien », CAUE de Paris, janvier 2022, www.caue75.fr/content/capsules-c-est-quoi-un-plu-bioclimatique.
- [20] Leconte (Christine), Grisot (Sylvain), *Réparons la ville ! Propositions pour nos villes et nos territoires*, Éd. Apogée, 2022.
- [21] « HOME, Habitat ouvert et sur-mesure », Conférence mensuelle Iceb Café, Institut pour la conception écoresponsable du bâti (Iceb), 14 mars 2022, www.asso-iceb.org/iceb-cafe-actualites/retour-sur-liceb-cafe-home-par-pascal-gontier/.
- [22] Cf. www.lillemetropole.fr.
- [23] Cf. <https://laclauseverte.fr>.
- [24] Commissariat général au développement durable (CGDD), Service de l'économie verte et solidaire (SEVS), *Plan national pour des achats durables – 2022-2025*, MTE, 15 mars 2022, www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNAD-PAGEPAGE-SCREEN%283%29.pdf.
- [25] Cf. Ferrua (Mathieu), « *Smart Building*. Le BIM, utile aussi pour l'exploitation et la maintenance des bâtiments », *J3e*, n° 876, mars 2020, numéro spécial « La mutation des compétences ».
- [26] Cf. la présentation de l'agence Construire sur le site [Arteplan.org](https://arteplan.org), janvier 2022, <https://arteplan.org/initiative/agence-construire/?msclkid=0921d871ae9e11ec9009032a431372ff>.
- [27] Durand Jeanson (Alexis), « L'AMU globale, une ingénierie d'avenir face à la complexité sociale du bâtiment et du territoire », Les blogs Actu-Environnement.com, 9 juillet 2018, www.actu-environnement.com/blogs/alexis-durand-jeanson/13/alexis-durand-jeanson-prima-terra-amu-globale-complexite-sociale-batiment-territoire-14.html?msclkid=f6d8c3a3aea211ec8c96475e58f7fe12.
- [28] *Livre blanc de l'assistance à maîtrise d'usage – Remettre l'humain au cœur du cadre de vie bâti*, Réseau AMU France, 2020, www.reseau-amu.fr/publications.
- [29] Noble (Grégoire), « Comment l'immobilier peut-il entrer dans la boucle de l'économie circulaire ? », Batiactu, 4 septembre 2018, www.batiactu.com/edito/comment-immobilier-peut-il-entrer-dans-boucle-economie-53880.php.