



HAL
open science

Smart Building for Smart City : les enjeux de l'adoption du BIM et de l'IoT

Nathalie Gardes, Pascal Frucquet, David Carassus, Didier Chabaud, Pierre
Marin

► To cite this version:

Nathalie Gardes, Pascal Frucquet, David Carassus, Didier Chabaud, Pierre Marin. Smart Building for Smart City : les enjeux de l'adoption du BIM et de l'IoT. Special Interest Group n°9, " Gouvernance, Innovation, et Durabilité de la Ville Intelligente ". In 3rd International Conference on Digital, Innovation, Entrepreneurship & Financing, Dec 2021, Lyon, France. hal-03552453

HAL Id: hal-03552453

<https://hal-univ-pau.archives-ouvertes.fr/hal-03552453>

Submitted on 2 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Smart Building for Smart City : les enjeux de l'adoption du BIM et de l'IoT

Nathalie Gardes, Pascal Frucquet, David Carassus, Didier Chabaud, Pierre Marin

Introduction

Si de premières expériences ont pu être identifiées dans les dernières décennies du XXème siècle, le concept de *Smart City* ou « Ville Intelligente » en français s'est particulièrement développé à partir des années 2000, notamment à la faveur d'initiatives portées par de grands industriels comme IBM ou Cisco (Sharifi et al. 2021). La rapide diffusion de ce concept dans le monde s'explique notamment par la recherche de solutions aux défis de l'urbanisation croissante, du changement climatique et de la raréfaction des ressources. L'intelligence de la Ville, entendue au sens de la cité grecque (« polis »), se situerait ainsi dans sa capacité à anticiper, accompagner et résoudre les problèmes de sécurité, d'infrastructures et de transport, d'éclairage urbain, d'arrosage des parcs et jardins, de lien social, de durabilité, de santé, etc. (Agbali et al., 2019 ; Azevedo et al., 2018 ; Mosannenzadeh et Vettorato, 2014).

Les recherches sur cette thématique et les projets de Villes Intelligentes ou de Territoires Intelligents se sont multipliés, notamment depuis 2015 (Sharifi et al., 2021). La pandémie de COVID-19 a impulsé un élan supplémentaire en faveur des solutions urbaines intelligentes pour améliorer la résilience face à la crise. Deux grandes approches de la *Smart City* co-existent (Picon, 2015) : celle centrée sur l'optimisation des fonctions urbaines par le recours massif aux technologies numériques, et celle centrée sur une mobilisation de ces technologies pour favoriser la production et le partage des connaissances au service d'une amélioration de la qualité de vie, d'un développement du capital humain (Nam et Pardo, 2011). Nos travaux se situent ainsi à l'interface entre ces deux approches en se centrant sur le bâtiment que nous proposons de considérer comme un sous-système de la ville et un de ses éléments constitutifs de base. Le bâtiment est en effet à la fois infrastructure et cadre de vie, autonome et intégré dans un écosystème urbain et territorial. Les bâtiments sont responsables de 40 % de la consommation totale d'énergie en Europe et de 24% des émissions de gaz à effet de serre. Leur performance énergétique est un élément déterminant de la qualité de vie et de travail de tous les citoyens (Apanaviciene et al., 2020). Le télétravail, le maintien à domicile, l'optimisation énergétique, la qualité de l'air, etc. passent par les bâtiments. L'enjeu est donc fort. Pour être durable et intelligent au niveau des villes, il faudrait l'être au niveau des bâtiments.

Pourtant, peu d'études existent sur les relations entre *Smart Building* et *Smart City* et la pertinence de considérer le bâtiment comme premier maillon de la *Smart City*. La littérature sur les *Smart Buildings* ou « Bâtiments Intelligents » est essentiellement consacrées aux enjeux en termes de technologies et d'usages des deux grandes technologies que sont le *Building Information Modeling* (BIM) et l'Internet des objets (IoT, pour *Internet of Things* selon la terminologie Anglo-Saxonne). Le BIM recense dans un environnement numérique partagé, assorti de modalités de restitution en trois dimensions (3D) voire plus (4D, 5D, 6D, etc.) tous les « objets » du bâtiment au sens large, mais aussi les modalités d'interventions des différents acteurs du projet, à toutes les étapes de son cycle de vie (Emmerich,

2020). L'Internet des objets (IoT, pour *Internet of Things* selon la terminologie Anglo-Saxonne), en interconnectant différents dispositifs dotés de capteurs, apparaît comme une condition préalable fondamentale pour parvenir à la réalisation de bâtiments intelligents (Fokaides et al., 2018 ; Malagnino et al., 2021 ; Jia et al., 2019). Les objets connectés génèrent en effet une quantité importante de données qui va permettre de créer de l'intelligence à l'échelle du bâtiment (contrôle et gestion des performances énergétiques) puis d'un quartier (optimisation des lignes de bus en fonction de la fréquentation par exemple). Utilisées de façon stratégique ces données pourraient changer les façons de produire, de consommer et d'habiter la ville.

Dans ce sens, plusieurs entreprises ont lancé des solutions de bâtiments intelligents (IBM, Intel, Schneider notamment). Pour autant, en France comme en Europe, la mise en œuvre du BIM parmi les acteurs industriels européens reste limitée. En Europe, 29 % des entreprises de construction utilisent le BIM 3D tandis que 61 % ne l'ont jamais utilisé. Les chiffres s'aggravent en ce qui concerne le BIM 4D, avec seulement 6 % des entreprises qui l'appliquent (European Construction Sector Observatory 2019). Ainsi, alors que la capacité des technologies numériques à changer et à améliorer la vie des gens (Feenberg, 2019 ; Sadowski, 2020) et leur potentiel à fournir un environnement bâti intelligent et durable aux citoyens a été démontrée, comment comprendre la faible adoption du BIM et des Bâtiments Intelligents ? Les réalités spécifiques au secteur (production artisanale, unicité des projets), la complexité de l'industrie de la construction (Joensuu et al., 2020) et des difficultés propres à l'adoption des technologies IoT (Pal et al., 2021 ; Yang et al., 2017) font probablement partie des facteurs explicatifs de la faible transition numérique. En fait, peu de recherches se sont intéressées à l'adoption du BIM et de l'IoT dans le secteur du bâtiment. Il existe peu d'études qui adressent les problématiques managériales et organisationnelles auxquelles les acteurs sont confrontés.

Notre intention à travers cette recherche est ainsi de **comprendre comment favoriser l'adoption de ces solutions technologiques pour contribuer au développement des bâtiments intelligents, dans une dynamique d'intégration et d'interaction avec les Villes et les Territoires Intelligents ?** Quels sont les facteurs limitatifs au déploiement de ces solutions ? La question doit-elle être traitée uniquement au niveau des acteurs de la filière Bâtiment et Travaux Publics (BTP) ou intégrer la vision des clients et des autorités publiques ? Comment ces dernières (Etat, Centres Hospitaliers, Collectivités territoriales) peuvent-elle contribuer à favoriser l'adoption des solutions BIM / IOT au service de bâtiments intelligents ?

Pour répondre à ces questions, nous avons d'abord procédé à une revue de la littérature relative aux Bâtiments Intelligents et à leur intégration dans les Villes Intelligentes afin de proposer un modèle de recherche exploratoire (1). Ensuite, comme nous le présentons en seconde partie (2), nous avons procédé à une étude qualitative exploratoire permettant de mettre en évidence de premiers résultats et de préciser notre modèle de recherche.

1 Revue de littérature

1.1 Les objets connectés et le BIM, clé de voute des Bâtiments Intelligents

Le concept de *Smart Building* a vu le jour dans les années 80 (Sinopoli et Sinopoli, 2010) puis a gagné une popularité remarquable au cours des dernières années (Al Dakheel et al., 2020). Malgré son ancienneté et son intérêt grandissant, la définition du *Smart Building* reste ambiguë et il n'existe pas de réel consensus autour de ce concept (Mofidi et Akbari, 2020). Les premières définitions font référence à la notion de contrôle de l'environnement. Un Bâtiment Intelligent est celui qui contrôle totalement son propre environnement (éclairage, chauffage, climatisation, ascenseurs..." (Stubblings, 1988). Pour Wang et al. (2012), le Bâtiment Intelligent répond à la fois aux questions d'intelligence et de durabilité grâce à l'utilisation des technologies permettant d'obtenir les combinaisons optimales de niveau de confort et de consommation d'énergie. A la notion de contrôle s'ajoute donc la notion de technologie. D'autres définitions pointent les notions d'interaction, de réactivité, d'adaptabilité du bâtiment (Kiliccote et al., 2011) ainsi que le recours aux sources d'énergies renouvelables (De Groote et al., 2017). Nous pouvons retenir 5 caractéristiques fondamentales des *Smart Building* : 1) l'automatisation (maintenance prédictive, identification en temps réel des défauts/comportements inattendus), 2) l'adaptabilité (reconnaître, apprendre et réagir aux besoins des utilisateurs en termes de confort, de santé et de sécurité), 3) l'interactivité (donner aux occupants du bâtiment les moyens de prendre le contrôle direct de leur consommation d'énergie), 4) l'efficacité (les bâtiments doivent être capables de minimiser leur demande d'énergie et de générer de l'énergie renouvelable, afin de couvrir leur consommation d'énergie), 5) la multifonctionnalité (la capacité à permettre l'exécution de plus d'une fonction dans un bâtiment) (Al Dakheel et al., 2020).

L'utilisation des nouvelles technologies notamment la connexion du bâtiment grâce à l'IoT et au BIM est une condition préalable fondamentale à la réalisation du *Smart Building*. Défini comme un réseau d'objets physiques interconnectés pour partager et exploiter divers services (Corno et al., 2019 ; Patrono et al., 2020) l'internet des objets (IoT) est la clé de voûte du système. Grâce à ses capteurs, l'IoT est en mesure de récupérer des données telles que la température, l'humidité, la luminosité ou la teneur en CO₂ (Shah et al., 2019) pour contrôler certains sous-systèmes tels que le chauffage, la ventilation et la climatisation, l'éclairage ou la sécurité, en tenant compte des paramètres environnementaux et de la localisation des occupants (Jia et al., 2019). Ces données rendent alors possible la maintenance prédictive pour une gestion optimale des installations (D'Elia et al., 2010 ; Srinivasan et al., 2017), une amélioration du confort intérieur par une adaptation automatique en fonction des préférences et des besoins des occupants (Kelly et al. 2013), enfin une gestion efficace des ressources : stationnement ou chargement des véhicules, optimisation de l'utilisation des espaces partagés (Rutishauser et al., 2005 ; Gonzalez et Zamarreno, 2005). Le Bâtiment Intelligent apparaît ainsi comme une plateforme de services à destination de ses utilisateurs, source de performance pour son propriétaire / exploitant et générant des externalités positives sur son environnement par combinaison de ses caractéristiques architecturales et techniques avec le potentiel des technologies numériques.

Le BIM quant à lui est une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment, permettant le partage d'informations pour la conception, la gestion et la maintenance des bâtiments (Chen et al., 2018). L'intérêt de la maquette numérique, lorsqu'elle s'associe aux IoT, réside dans la réduction des coûts, l'amélioration de l'efficacité des opérations, la qualité et les performances environnementales des projets des entreprises. En effet, la centralisation de la collecte de données permet la réalisation d'une seule simulation des comportements ou données pour l'ensemble des occupants au lieu d'en faire une pour chaque profil d'utilisateur de l'ouvrage, facilitant ainsi l'élimination d'erreurs sur l'estimation de la consommation énergétique du chauffage et de la ventilation liée aux comportements individuels. Cette combinaison permet, en outre, le contrôle intelligent du

bâtiment, en particulier des systèmes de climatisation ainsi que de la luminosité, de la température, de la consommation d'énergie tout en réduisant le nombre de capteurs (Lee et al., 2019).

De plus, en intégrant des sources de données telles que le SIG (Système d'Information Géographique) et les services météorologiques, il est possible d'obtenir une visualisation en (quasi) temps réel des consommations d'énergie et de modéliser et simuler le comportement du bâtiment en fonction des données du terrain et des conditions météorologiques réelles (Bottaccioli et al., 2017). Des stratégies énergétiques optimales peuvent ainsi être identifiées au niveau du bâtiment (Sava et al., 2018).

L'accès aux données, leur partage et leur utilisation via une intelligence artificielle constituent ainsi la clé de voûte du *Smart Building* (Panchalingam et Chan, 2019). Réguler la température en fonction des prévisions météorologiques, du comportement thermique du bâtiment, des préférences individuelles des habitants, de l'impact économique et ou carbone du système de chauffage ; prédire des usages, optimiser et anticiper les ressources disponibles, interpréter des données physiques hétéroclites, anticiper et détecter des défaillances sont des tâches complexes qui ne peuvent être prises en charge par un programme classique. Sans intelligence artificielle, il est impossible d'implémenter une gestion prédictive des espaces adaptée aux usages des occupants, de concevoir des recharges intelligentes pour les véhicules électrique (*i.e.* en fonction de l'état du réseau électrique tout en garantissant une charge complète à chaque fois qu'on en a besoin), ni de tenir compte des préférences individuelles pour un confort et bien être optimal (Strohbach, et al., 2015), ou d'anticiper le remplacement des équipements défaillants (Ewert, et al., 2018 ; Mynhoff et al., 2018). Si le BIM et l'IoT sont le socle du *Smart Building*, force est de constater que leur diffusion semble compliquée, ce qui nous conduit, pour cette étude, à mobiliser la littérature relative à l'appropriation des technologies et des innovations.

1.2 Les difficultés d'appropriation des Bâtiments Intelligents

La littérature identifie différents facteurs clés susceptibles d'affecter la décision des individus d'accepter et d'utiliser en permanence la technologie. La plupart des articles sur les réactions des individus reposent sur sept modèles théoriques fondamentaux : 1) la théorie de l'action raisonnée (TAR, Fishbein et Ajzen, 1975), 2) la théorie du comportement planifié (TCP, Ajzen, 1991), 3) la théorie du modèle d'acceptation (TAM, Davis, 1989), 4) la théorie unifiée de l'acceptation et de l'utilisation (UTAUT 1 et UTAUT 2, Venkatesh et al., 2003, 2012), 5) la théorie sociale cognitive (SCT, Compeau and Higgins 1995), 6) la théorie de la diffusion des innovations (Rogers, 2003), 7) la théorie des niveaux de représentation (Trope et Liberman, 2010). Ces modèles ont été développés à l'origine pour tester l'adoption de technologies non intelligentes (Im et Hancer, 2017 ; Lee et Cranage, 2018). Les variables explicatives qui ont été identifiées ne sont donc pas toutes pertinentes pour expliquer l'adoption d'une *Smart Home* mais ce socle théorique nous semble tout de même particulièrement utile pour questionner l'appropriation des technologies BIM et IoT par les acteurs du BTP et les utilisateurs finaux des bâtiments.

En ce qui concerne l'acceptation par les utilisateurs des solutions IoT dans le secteur de la construction, peu d'études se sont penchées sur les comportements des utilisateurs de ces services, bien que de telles études soient cruciales pour l'adoption et la diffusion rapide de la technologie de la maison ou du bâtiment intelligent. Les quelques articles sur le sujet soulignent que l'acceptation de l'IoT dans le secteur de la construction (*Smart Home*) n'est pas encore totalement acquise (Zaballos et al., 2020 ; Chen et al., 2018 ; Yang et al., 2017 ; Akanmu et Anumba, 2015). Selon Jourdan et al. (2019), cela est principalement dû aux problèmes de maintenance, de fiabilité et de sécurité perçus. Les risques de sécurité des systèmes IoT sont en effet importants. Contrairement aux réseaux traditionnels, l'IoT couvre

de nombreuses entités, services et réseaux hétérogènes, qui rendent difficile l'application directe des normes ou architectures de sécurité existantes (Jing et al., 2014). Ces applications contenant des données personnelles, elles suscitent non seulement des inquiétudes en termes de sécurité, mais également d'accès à la vie personnelle. Par exemple l'utilisation du GPS (*Global Positioning System*) à des fins de localisation (utile pour l'optimisation de la température de l'habitat) révèle notamment les allées et venues privées d'une personne. Bien que clairement encadrée, notamment par le RGPD¹, l'utilisation des données est par ailleurs un sujet sensible en termes de droit à la vie privée et d'opposition entre *Smart City* et *Safe City* (Minvielle et Wathelet, 2020). Ces éléments ne favorisent pas l'adoption de ces technologies (Yang et al., 2017). Les problèmes de sécurité et de confidentialité sont ainsi des défis à relever parce qu'ils sous-tendent la conception d'algorithmes de cryptographie de protection des communication (Alwan et al., 2018 ; Zhao et al., 2019a).

Toutefois la sécurité des données personnelles n'est pas le seul facteur expliquant un risque perçu élevé et une utilité perçue faible. Le manque d'éducation et de connaissances nécessaires à l'utilisation de la *Smart Home* y contribue également (Akanmu et Anumba, 2015 ; Pal et al., 2021). L'absence de conseils ou formations préalables, la faible connaissance des applications Smart conduit à une expérience utilisateur dégradée impactant négativement l'adoption (Han et al., 2021). Cependant bien que la formation facilite l'appropriation des technologies, celle-ci ne suffit pas si les technologies ne sont pas accessibles ou si elles ne correspondent pas à la marque/ type de produit préféré des consommateurs ou à leurs besoins (Han et al. 2021). Or à ce jour, il existe un écart entre les attentes premières, les besoins des utilisateurs et les solutions disponibles ou expérimentés (Pal et al., 2021). L'adoption d'un système IoT dépend de son orientation *User Centric* (Jia et al., 2019). Enfin, Yang et al. (2017) soulignent l'influence de facteurs endogènes liés à l'utilisation (automatisation, mobilité) et exogènes notamment la confiance dans les fournisseurs de services comme variables explicatives de l'adoption d'une *Smart Home*. Ces auteurs soulignent toutefois la faible influence de l'automatisation sur l'acceptation. Ils suggèrent que cela peut s'expliquer d'une part, par la préférence des individus pour le contrôle du lieu privé qu'est leur habitat et d'autre part, par l'insuffisance des fonctions d'automatisation proposées.

1.3 Le pouvoir d'agir des autorités publiques

Les acteurs publics contribuent de deux grandes manières au développement du BIM et des Bâtiments Intelligents (European Construction Sector Observatory 2019) : d'une part, en développant des politiques et réglementations plus ou moins incitatives, d'autre part en favorisant les visions intégrées et holistiques du développement urbain notamment au travers du concept de *Smart City*.

➤ Les politiques publiques et les réglementations

Un nombre croissant d'États membres de l'Union Européenne met en œuvre des politiques et des initiatives (contraignantes et non contraignantes) visant à favoriser l'adoption du BIM (European Construction Sector Observatory, 2019), en mobilisant à la fois les outils en matière de réglementation des autorisations d'urbanisme et les marchés publics.

En France, la loi ELAN (Evolution du Logement de l'Aménagement et du Numérique) du 16 octobre 2018 prévoit qu'à compter du 1er janvier 2022, toutes les communes devront être en mesure de recevoir

¹ Règlement Général sur la Protection des Données personnelles du 23 mai 2018 adopté par l'Union Européenne.

sous forme électronique les demandes d'autorisation d'urbanisme et que celles de plus de 3500 habitants devront également assurer leur instruction sous forme dématérialisée. Dans ce cadre, l'Etat met à disposition l'outil Plat'AU (Plateforme Autorisations d'Urbanisme)² qui doit permettre à l'ensemble des acteurs concernés par une demande d'autorisation d'urbanisme d'accéder en temps réel aux dossiers. Les maquettes BIM ont ainsi vocation à servir de pivot de collaboration entre l'ensemble des parties prenantes des projets.

Pour accompagner le développement du BIM, le Plan BIM 2022³ a été engagé par le Ministère chargé du Logement, prenant ainsi la suite du Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB) de 2014 dont la vocation était déjà d'encourager la transformation digitale de la filière du bâtiment. Il comprend ainsi deux grands axes : généraliser et structurer la demande de BIM dans les projets en accompagnant et sécurisant les maîtres d'ouvrage pour définir et encadrer leur besoin ; accompagner l'ensemble des acteurs pour se doter des outils dont ils ont besoin et soutenir leur montée en compétences.

Sur un plan réglementaire, le Code de la Commande publique prévoit en son article R 2132-10 que l'acheteur *peut, si nécessaire, exiger l'utilisation d'outils et de dispositifs qui ne sont pas communément disponibles, tels que les outils de modélisation électronique des données du bâtiment ou des outils similaires*, ouvrant ainsi la possibilité d'imposer le recours au BIM dans toutes les constructions réalisées dans le cadre de commandes publiques. Le nouveau Cahier des Clauses Administratives Générales (CCAG) des marchés publics de Travaux publié le 30 mars 2021 décrit ainsi deux types d'outils à destination des donneurs d'ordre publics : le cahier des charge BIM⁴ et la convention BIM⁵.

➤ L'intégration du BIM aux politiques de Villes et Territoires Intelligents

Deux modalités d'intervention potentiellement favorables au développement du BIM et de l'IOT dans les bâtiments ont pu être identifiées, correspondant à des phases différentes du cycle de vie des bâtiments et des espaces publics.

En phase de conception, plusieurs études mettent en évidence les relations étroites entre le BIM et le *City Information Modeling* (CIM) (Liu et al. 2021; Souza et Bueno 2022). Le concept de CIM fait encore l'objet de nombreuses discussions mais il peut être défini comme un outil de visualisation et de simulation équivalent au BIM, mais pour les villes et les territoires, offrant ainsi la possibilité de discussions entre toutes les parties prenantes d'un projet en s'appuyant sur une base de données urbaine ou territoriale complète et actualisée en temps réel. Les informations issues des maquettes BIM viennent ainsi nourrir celles des jumeaux numériques, tandis que les maquettes BIM sont elles-mêmes alimentées par certaines des données essentielles à la conception des bâtiments depuis le jumeau numérique. White et al. (2021) décrivent ainsi le CIM comme un outil de renouvellement du dialogue avec les citoyens sur

² <https://www.ecologie.gouv.fr/dematérialisation-des-autorisations-durbanisme-1>

³ <https://plan-bim-2022.fr/>

⁴ *Le cahier des charges BIM est le document élaboré par le maître d'ouvrage précisant les exigences et les objectifs des intervenants successifs du projet. Il constitue le volet BIM du programme du maître d'ouvrage.*

⁵ *La convention BIM de l'opération est le document décrivant les méthodes organisationnelles, de représentation graphique, la gestion et le transfert des données du projet, ainsi que les processus, les modèles, les utilisations, le rôle de chaque intervenant et l'environnement collaboratif du BIM. A chaque étape du cycle de vie du projet, la convention évolue et s'adapte aux nouveaux acteurs, à des usages nouveaux ou à des nécessités du projet.*

les projets, notamment à la faveur des modalités de restitution en 3D (trois dimensions) qui favorisent l'appropriation des projets par les acteurs de la ville et l'expression de leurs observations. En couplant technologies BIM et CIM, les pouvoirs publics semblent ainsi disposer de nouvelles opportunités pour développer des démarches d'aménagement urbain plus *User Centric* dans le cadre du développement de politiques de *Smart Cities*. Dans ce sens, Nesti (2020) souligne combien les Villes Intelligentes « *représentent un modèle de gouvernance basé sur la collaboration entre les parties prenantes locales, la participation citoyenne, l'innovation expérimentale (...)* » proposant une caractérisation de ces politiques au travers du cadre d'analyse de la Nouvelle Gouvernance Publique. La combinaison des approches BIM et CIM semble en effet de nature à soutenir le développement d'un « *continuum des modes de co-production* » (Osborne et Strokosch 2013, 13) dans la conception des nouveaux aménagements urbains. Il est à noter que ce potentiel peut également être mobilisé par les acteurs publics dans la dernière phase du cycle de vie des bâtiments, c'est-à-dire la phase de rénovation ou de déconstruction.

En phase d'exploitation, la dynamique BIM – CIM reste pertinente, même si l'enjeu majeur semble se situer dans la capacité du Bâtiment Intelligent à s'intégrer dans l'écosystème intelligent impulsé par les autorités locales, mais également à en être contributif. Apanaviciene et al. (2020) proposent ainsi un cadre d'évaluation de l'intégration des bâtiments intelligents dans une Ville Intelligente et mettent en évidence au terme de leur recherche que les plus hauts niveaux de potentialités portent sur les domaines de l'énergie, de la mobilité, de la vie et de l'environnement intelligents. L'enjeu est que le bâtiment bénéficie d'un flux descendant de données pour lui permettre d'être plus réactif, puis génère à son tour un flux ascendant de données qui vienne contribuer à son tour à l'amélioration du cadre de vie portée dans le cadre des politiques *Smart City* (Heaton et Parlikad 2019). En déployant des écosystèmes intelligents ouverts et participatifs dans le cadre des politiques *Smart City*, les autorités locales créent ainsi les conditions du développement des Bâtiments Intelligents et du déploiement d'objets connectés. Le Bâtiment Intelligent et la Ville Intelligente apparaissent ainsi comme la rencontre entre deux modèles de cocréation de valeur, l'un plutôt porté par les acteurs privés, l'autre plutôt porté par les acteurs publics. Dans le premier, en référence au modèle en cercle vertueux proposé par Yu et al. (2019) le Bâtiment Intelligent est dans la position de créer la proposition de valeur, l'écosystème Ville Intelligente étant dans la position de l'utilisateur. Dans le second modèle, c'est le Bâtiment Intelligent qui devient « consommateur » de la Ville Intelligente et contribue à sa valeur d'usage. Le point commun de ces deux approches est de nécessiter un questionnement sur les modalités de gouvernance et de leadership afin de créer les conditions de la valeur d'échange. Ceci constitue un axe de convergence supplémentaire entre *Smart Building* et *Smart City* qu'il convient donc d'intégrer dans le modèle de recherche exploratoire que nous présentons maintenant.

1.4 Un modèle de recherche exploratoire

L'exploration de la littérature relative au *Building Information Modeling* (BIM), à l'Internet des Objets (IoT), aux Bâtiments Intelligents et à leur intégration dans les écosystèmes « Villes et Territoires Intelligents » nous a permis d'identifier un certain nombre de facteurs limitatifs ou incitatifs récurrents.

Concernant les facteurs limitatifs, nous identifions ainsi 3 facteurs :

1. Le degré d'appropriation des technologies numériques par les acteurs de la filière BTP, les autorités publiques et les utilisateurs finaux ;
2. Le niveau de contribution à la performance financière des bâtiments ;

3. Les risques perçus par les utilisateurs finaux quant à l'utilisation de ces technologies.

Concernant les facteurs incitatifs, nous retenons, au terme de cette revue de littérature 2 facteurs :

1. Le cadre réglementaire et les actions des autorités publiques pour favoriser l'effet de levier ;
2. Les politiques de Villes et Territoires Intelligents, tant pour leur ambition de contribuer significativement aux objectifs de Développement Durable que pour les dynamiques de circulations des données entre acteurs publics et privés qu'elles favorisent.

La combinaison de ces 5 facteurs limitatifs et incitatifs constitue ainsi le cadre d'analyse que nous avons mobilisé dans l'exploration empirique dont nous présentons les modalités et les résultats en seconde partie.

2 Méthodologie et Résultats

2.1 Méthodologie

Pour répondre à notre questionnement initial, nous avons engagé une étude qualitative exploratoire combinant réalisation d'entretiens semi-directifs et exploration de sources secondaires, sur la base d'une grille d'analyse issue de notre modèle de recherche exploratoire.

Une dizaine d'entretiens semi-directifs a été conduite auprès d'acteurs de la filière du BTP et des collectivités locales françaises (Table n°1). Ces entretiens ont été systématiquement enregistrés, retranscrits sous forme de *verbatim*, puis fait l'objet d'une analyse manuelle de contenu. L'échantillon constitué pour cette recherche exploratoire répond à un critère de variété au niveau des acteurs. Nous avons ensuite été guidés par le principe de redondance thématique. Les derniers entretiens ne faisant pas émerger de nouveaux thèmes, nous n'avons pas ainsi pas jugé utile d'interroger un nombre d'entreprises et de collectivités plus important dans le cadre d'une démarche exploratoire.

Table n°1 :

Fonction	Type d'acteur	Taille
PDG	Start-Up 1 : Gestion d'installation informatique	<ul style="list-style-type: none"> • CA non connu • 10 à 20 salariés
PDG	Start-Up 2 : Edition de logiciels applicatifs	<ul style="list-style-type: none"> • CA [200 000- 400 000] • 1 à 10 salariés
Président	French Prop-Tech	
VP stratégie	Grande Entreprise : fabrication de matériel de distribution et de commande électrique	<ul style="list-style-type: none"> • CA25,2 Md€ • Plus de 100000 salariés
Architecte 1	Grande entreprise secteur bancaire	<ul style="list-style-type: none"> • CA non connu • 2000 salariés
Architecte 2	Agence indépendante	<ul style="list-style-type: none"> • CA non connu

		• 2 associés
Directeur du Numérique	EPCI	130 000 habitants
Responsable Mission 3D	EPCI	130 000 habitants
Chargé mission Renouvellement Urbain	EPCI	130 000 habitants

Ces entretiens ont été complétés par l'exploration de différentes sources secondaires : rapports institutionnels, rapports d'activité de collectivités, livres blancs rédigés par les acteurs de la filière, etc. Notre objectif était de repérer, dans les discours écrits produits par les *start up* et les entreprises d'une part, les collectivités locales d'autre part, les déterminants de l'appropriation des technologies BIM et IoT au service des Bâtiments Intelligents dans le cadre des dynamiques *Smart Cities*.

Nos entretiens comme notre exploration des sources secondaires se sont articulés autour des questions suivantes, formulées sur la base de notre modèle de recherche exploratoire :

- Comment le BIM et l'IoT contribuent à rendre les Bâtiments Intelligents et comment ces Bâtiments Intelligents contribuent-ils aux politiques de Villes et de Territoires Intelligents ?
- Quels sont les facteurs incitatifs et limitatifs au développement des technologies BIM et IoT dans la filière BTP ?
- Quel est le degré d'appropriation des technologies BIM et IoT par les acteurs de la filière BTP ? Par les autorités publiques ? Par les utilisateurs finaux ?
- Avez-vous effectivement mesuré un impact financier et/ou organisationnel du recours à ces technologies ?
- Quels risques associez-vous à ces technologies ?
- Comment pensez-vous que les autorités publiques, nationales et/ou locales, peuvent contribuer au développement des technologies BIM et IoT dans la filière BTP ?
- Pensez-vous que l'encouragement au recours à ces technologies par les autorités publiques peut contribuer à créer de la valeur à l'échelle d'un territoire ? Si oui, quel type de valeur ?

Le cadre méthodologique de cette démarche exploratoire nous permet maintenant de présenter les premiers résultats que nous pouvons mettre en évidence.

2.2 Le bâtiment, première maille de la Ville Intelligente

Les acteurs privés du secteur du BTP que nous avons pu rencontrer parlent de « granularité », de « poupées russes », pour décrire le phénomène de la *Smart City*. Ils défendent l'idée selon laquelle seule une approche *bottom-up* est en mesure de rendre possible la construction de l'intelligence d'une ville. Ils s'accordent pour dire que le bâtiment est la composante essentielle, le premier maillon de la *Smart City*. « C'est à l'échelle du bâtiment qu'on va créer l'intelligence énergétique de la ville pour une meilleure gestion des ressources » (VP stratégie GE). Ce qui suppose l'équipement des bâtiments par des objets connectés comme en témoigne le Pdt SU : « Le commencement d'une Ville Intelligente est la connexion de l'immeuble à ses habitants et à son quartier via des IoT ». C'est en effet au niveau de l'immeuble que de la donnée utile aux services publics va pouvoir être produite et permettre l'intelligence d'un quartier. « Les capteurs sur les poubelles vont permettre de mieux gérer le service

des éboueurs, le Smart Grid va gérer la borne de recharge électrique et optimiser les flux » Pdt FPT. De même l'éclairage et des lignes de bus, l'intervention des services publics pourront être gérés de façon intelligente et s'adapter en fonction des besoins.

Le jeu entre l'immeuble et le quartier repose selon les acteurs interrogés sur la portée des services et l'impact que celui-ci va avoir sur les grandes infrastructures. L'électricité, les déchets, l'eau, tous ces éléments qui sont structurels pour une ville, vont pouvoir être mutualisés et rendus intelligents grâce à leur interconnexion. L'enjeu est donc l'équipement et la connexion du bâtiment avec des IoT d'une part, et l'utilisation et l'appropriation des IoT par les individus d'autre part. Cela implique à la fois une dynamique d'appropriation des technologies par des *Smart Citizens*, et l'échange et le partage des données collectées entre les acteurs selon un cadre d'interopérabilité.

2.3 L'interopérabilité :

Les enjeux de l'interopérabilité portent à la fois sur l'expérience utilisateur et les relations entre les acteurs.

➤ Pour une approche plus *user friendly* et une expérience en *continuum*

Le marché des IoT est en pleine croissance. Pour la maison, ce marché double tous les ans. Pour autant les acteurs interrogés soulèvent la question de l'appropriation des technologies par les clients « *Sur les immeubles équipés, un tiers des habitants n'active même pas le système, un tiers l'utilise très peu. Il n'y a qu'un seul tiers de vrais utilisateurs, donc ce n'est pas une adoption de masse... pourquoi ?* » Pdt SU 1. Le problème d'appropriation des technologies par les utilisateurs semble être lié à une utilité perçue faible. « *Je ne suis pas sûr qu'on ait trouvé un cas d'usage qui fasse wow C'est du gadget ! En fait on est dans des Nice to Have, pas des Must to Have... on peut vivre sans* » Pdt SU1. Ce faible intérêt peut s'expliquer par la faible incitation économique des utilisateurs lié au fait qu'en France l'énergie est peu chère. Les acteurs interrogés précisent que sur ce point la donne pourrait changer avec le triplement du prix du gaz. « *Si on a des enjeux sur la facture, si celle-ci devient trop chère... si je gagne de l'argent... alors les applications deviendront intéressantes* ». Ils témoignent également d'une évolution favorable inhérente au changement de mentalité et à la prise de conscience de nos impacts sur la planète. « *Pendant très longtemps l'efficacité énergétique ce n'était pas fun... avec l'augmentation de l'énergie et des problématiques environnementales ça change... On commence à prendre conscience de combien on consomme... en France on est habitué à ce que l'énergie soit un due... or aujourd'hui l'efficacité énergétique est prioritaire et donc cela devient plus fun, sexy surtout auprès de la jeunesse plus impliquée* » VP stratégie GE. Des évolutions donc au niveau des mentalités, largement soutenue aussi par la nouvelle RE 2020.

Au-delà de l'intérêt économique, une seconde dimension grippe cette appropriation, celle liée à l'absence de services agrégés. À ce jour, les mises en œuvre des architectures IoT sont limitées à des domaines particuliers d'applications et ne répondent qu'à des exigences limitées d'applications spécifiques, qui n'interagissent pas entre elles de manière globale et normalisée. Les frontières technologiques et applicatives, l'absence d'interopérabilité rendent difficile la conception et l'intégration dynamique de nouveaux types de services. Selon les acteurs interrogés, l'absence d'écosystèmes IoT ne permet pas de créer des solutions globales centrées sur l'utilisateur. « *La valeur perçue de l'utilisateur est faible à ce jour, il faudrait être en mesure de construire une offre agrégée de services pour assurer une expérience en continuum* » Pdt SU2. L'enjeu est donc d'augmenter la valeur perçue à travers d'une part l'évolutivité des services et d'autre part, la diversité de ces services qui va

notamment permettre de multiplier les usages. « *L'effet wow dans le smart c'est le carré du nombre d'usages qui interagissent entre eux. Il faut que de l'application d'uber on puisse donner le moyen de passer le portail de la maison... ça suppose un système qui inter-opère entre la visiophonie et la serrure... Si on reste dans des solutions en silo, le bénéfice d'usage qui ne peut fonctionner qu'avec un continuum d'usage n'existe pas...* » Pdt SU1. L'interopérabilité est donc un levier essentiel. « *C'est l'interopérabilité qui crée la valeur, il faut que les services parlent entre eux* » Pdt SU2. Ressort un besoin d'agréger différents services de manière à ce que leur combinaison réponde aux besoins des utilisateurs. Il existe un gap entre les attentes premières, les besoins des utilisateurs et les solutions disponibles ou expérimentés.

Par ailleurs, le système IoT n'est pas suffisamment *User Centric*. Il existe de nombreux cas où les architectes et les développeurs d'un système IoT avancé mettent trop l'accent sur les parties techniques du système tout en ignorant les besoins réels des utilisateurs au sein du bâtiment. Des progrès restent à faire pour développer des fonctionnalités qui amélioreront l'expérience de l'utilisateur et formeront un environnement bâti intelligent et convivial est nécessaire. Cela passe par la facilité d'utilisation et le zéro effort. Or, si aujourd'hui le zéro effort prime, ceci n'est pas pensé. « *Les gens ne veulent pas gérer les applications, il faut que ce soit automatique* » Pdt SU2. « *Un bon système smart, ce n'est pas forcément un système qu'on va utiliser, ça peut être des systèmes très automatisés qu'on ne voit pas... On a créé de nombreux systèmes dans lesquels on demande une interaction avec l'utilisateur dont il n'a pas forcément envie. Peut-être on pourrait embarquer tout le monde comme ça, avec un appartement intelligent qui fonctionne tout seul...* » Pdt SU1. La facilité d'utilisation et l'effort attendu sont donc des variables importantes de l'appropriation des IoT. Toutefois sur ce point deux problèmes se posent : d'une part la maturité technologique n'a pas encore atteint ce stade d'automatisation et d'autre part il y a des problématiques d'acceptabilité liée à la perte de contrôle de son habitat. « *Le chez soi est intime et donc avoir un système qui va imposer que la température tombe à 18 degrés quand vous n'êtes pas là, ça peut sembler comme une violation de ses droits individuels, donc il va y avoir un problème de gouvernance, car il y a de nombreuses frontières dans la Smart City qu'on ne va pas pouvoir franchir sans ça* » Pdt SU2. A ce sujet l'expérimentation conduite par Wing concernant les thermostats intelligents est édifiante. Pour connaître les besoins d'électricité, et optimiser le Smart Building cela supposait la mise en place d'un système de géolocalisation des individus. Or sur ce point les utilisateurs étaient très réticents pour accepter d'être géolocalisé en permanence.

Au-delà de la réponse aux besoins de l'utilisateur, une réflexion doit être portée également sur l'accompagnement du client dans l'utilisation des outils. La formation de l'utilisateur est un élément important de son appropriation. « *Les immeubles dans lesquels on a expliqué aux utilisateurs le fonctionnement du device, il y a trois fois plus d'adoption, donc là il y a un enjeu d'éducation, d'accompagnement qui n'est pas forcément mis en œuvre et qui coûte cher...* » Pdt SU1.

➤ Construire l'interopérabilité : coopération des acteurs

L'interopérabilité est un enjeu essentiel à double titre. D'une part, parce que de cette interopérabilité dépend l'attractivité des IoT. C'est dans un *continuum* de services que réside la valeur. D'autre part, parce que pour construire un bâtiment et un quartier intelligent, il faut certes pouvoir gérer et exploiter les données des citoyens de façon fiable et pertinente, mais avant cela il faut surtout être en mesure d'échanger et de partager les données. Or à ce jour, il n'existe aucun logiciel qui casse les silos. L'échange de données et leur partage suppose la coopération des acteurs. « *Le chemin est long... si je veux connecter : une borne électrique, une batterie, un système de chauffage, les panneaux solaires et*

compteurs linkys, il faut trouver un système où les parties prenantes s'échangent les données or cette culture de l'api et de l'échange de données n'existe pas. On a des api avec des systèmes propriétaires, on doit ré-apprendre un langage à chaque fois... » Pdt SU1. Avant donc de parler de data et de gouvernance des datas, il est nécessaire de résoudre l'échange et le partage des données pour être en mesure de concevoir des systèmes interopérables. « Pour fermer les volets roulants quand il fait chaud, il faut que les systèmes du fabricant de volets roulants et du thermostat se parlent. Or aujourd'hui ils ont des systèmes qui ne peuvent se parler donc le thermomètre intelligent ne peut adresser le problème de fermer ou ouvrir les volets. La clé du truc elle est là ... ». Pdt SU2. Selon les acteurs interrogés, la problématique d'interopérabilité est totalement occultée pour plusieurs raisons. D'une part, les acteurs du bâtiment sont des organisations qui ne disposent pas d'une culture digitale suffisante. D'autre part, il existe des logiques propriétaire contre-productives qui les conduisent à choisir de façon délibérée des solutions qui ne peuvent pas se parler entre elles. Si les acteurs ne sortent pas de ces logiques propriétaires le risque est grand que le marché soit disrupté par les GAFAs (Pdt SU1). Ces acteurs sont en effet en mesure de pouvoir créer une expérience en *continuum*. Or la valeur est créée par la prestation globale, la possibilité de bénéficier d'une offre *packagée* qui communique. Il faut pour cela une logique coopérative co constructive qui dépasse les entreprises du bâtiment. L'émergence du Label R2S est qui facilite la connectivité des services est une avancée en ce sens.

2.4 Des barrières au changement : un écosystème qui n'est pas prêt

Au-delà de ces logiques propriétaires et de l'échange des données, une autre difficulté est celle des résistances au changement. Les acteurs n'arrivent pas à trouver des relais commerciaux. « Les chauffagistes ont une culture du digital nulle donc ils voient un petit CA additionnel et beaucoup de complexité donc ils n'ont pas envie de le vendre. Les bailleurs sociaux et foncières font des expérimentations mais on n'a personne à qui parler, il n'y a personne pour décider. Où sont les ingénieurs capables de porter ces projets, où sont les acheteurs capables de regarder les devis ? » Pdt SU1.

Les acteurs s'accordent sur la nécessité de l'introduction du digital dans la rénovation, mais l'écosystème n'est pas prêt à le faire. Il existe de nombreuses résistances au changement. Certaines sont liées aux intérêts économiques personnels de certains acteurs « Saint Gobain n'adhère pas à l'idée d'avoir une application qui permette de suivre ses consommations en temps réel. Il n'admet pas que cela puisse générer de la performance énergétique.... Alors évidemment ! Ça rapporte 10 fois moins que vendre la laine de verre » VP stratégie GE. D'autres sont relatives aux changements organisationnels que cela implique. « Refaire des bilans de promotion qui sont maîtrisés depuis 35 ans, adapter une charge foncière à des projets d'investissement...il y a des process, des fonctionnements sur toute la filière qu'il faut faire évoluer » Pdt SU2. La raison pour laquelle le changement prend du temps réside dans le fait que cela suppose une évolution dans la façon de travailler de l'ensemble des acteurs de la filière. Ce qui implique l'acquisition de nouvelles compétences. « Les acteurs doivent apprendre de nouveaux métiers, vous devez expliquer que le digital en fait partie » VP stratégie GE. En plus des compétences, les acteurs interrogés soulignent la problématique du coût et du ROI. « Une problématique des bailleurs c'est de dire vous allez nous rajouter une couche d'équipement supplémentaire donc une problématique de maintenance en plus des VMC etc donc on rajoute une couche de matériel. Les bailleurs répondent : on n'a pas les capitaux et on n'a pas les compétences pour la maintenance ». Sans compétences, le retour sur investissement est perçu comme plus faible. La décision est difficile car plus risquée. Pour opérer une telle transformation des pratiques professionnelle cela nécessite de réfléchir

sur les modèles d'affaires. « *Par quoi on commence ? on sait que ce n'est pas une question de technologie. Les technologies sont mûres même s'il y a des applications à développer encore, par contre on sait que la conduite du changement est un enjeu majeur* » VP stratégie GE.

Un point positif souligné par les acteurs est une réglementation qui devient plus favorable « *La RE 2020 est une révolution ... elle est bien écrite pour avoir de l'environnement et de l'usage. Le politique dit oui au numérique mais ça fait « chier » tout le monde de mettre des applis mobiles* » Pdt SU1. Les acteurs interrogés déplorent les résistances au changement alors même que les enjeux sur le numérique sont élevés. « *Le législateur a de bonnes intentions, mais la problématique que l'on a c'est l'aval ! Comment on fait pour que tous les acteurs aient des facilitations, des incitations, des réglementations pour que ça se fasse au-delà de l'idée qui est bonne car dans les faits ensuite tout est fait pour que ce soit non appliqué ou détourné* » SU1. L'image des poupées russes se retrouve sur le cycle décisionnel. L'immobilier est avant tout un projet territorial. C'est au niveau des villes, de la région, là où il y a une prise de décision au niveau local que les choix s'opèrent. « *A un moment donné, il faut aller convaincre toutes ces strates, donc c'est un travail, un dur labeur ...* » Pdt SU2. Le plus difficile semble être les collectivités car il y a de nombreux acteurs. L'innovation peut réussir seulement si elle s'inscrit dans un écosystème vaste avec moins de barrières notamment réglementaires.

2.5 Le BIM une solution à fort potentiel mais qui est encore en phase de R&D

Comme pour l'IoT, les professionnels rencontrés sont partagés entre l'enthousiasme devant le potentiel d'usages offert par le BIM et la déception devant la faible diffusion de ces technologies : « *on n'en est pas encore là* » (Archi. 2), « *le BIM n'est pas mature, il faut le tester* (Archi 1.). De manière unanime, tous les acteurs rencontrés soulignent la dynamique de recherche et développement (R&D) caractéristique des technologies BIM ou des bâtiments construits en mobilisant ces outils. La dynamique de R&D est encore plus marquée concernant la phase d'exploitation du bâtiment (Archi. 1).

La première explication avancée est celle du degré d'industrialisation de la filière du BTP. La Ville peut ainsi être lue comme un agrégat de prototypes d'immeuble, produits par des acteurs qui n'ont pas industrialisé leur façon de construire. « *On construit comme il y a 40 ans... on est dans un processus totalement artisanal on ne peut pas mettre du digital parce qu'on ne peut pas industrialiser* » VP stratégie GE. « *Dans chaque projet il y a des spécificités.... Et donc des « merdes » qui génèrent des problèmes de qualité des IoT... pas de respect du cahier des charges technique...* » Pdt SU1. Un autre architecte complète : « *on a beaucoup de projets qui se disent je suis un projet en BIM, mais on n'a pas toujours les mêmes rigueurs de suivi, les mêmes rigueurs de mise en place de maquettes. Donc on se retrouve avec des projets très hétéroclites qui veulent tous dire BIM et donc on a des gens qui vont réagir de manière très différente* (Archi. 1). Or les questions de structuration des données, de respect des formats prévus dans les conventions BIM établies par le maître d'ouvrage, constituent un vrai défi. Toutefois, celui-ci ne constitue pas non plus, selon les architectes rencontrés, une grande nouveauté par rapport aux difficultés régulièrement déplorées par les maîtres d'ouvrages quant à la transmission des dossiers des ouvrages exécutés (DOE) en fin de chantier par les entreprises en charge de la construction. L'enjeu est donc à la fois culturel et organisationnel, justifiant de « *se donner les moyens de le faire, de s'interroger dans tous les appels d'offre sur les compétences BIM, les modalités d'organisation interne, la présence de BIM Managers, la capacité à piloter et driver les entreprises sous-traitantes, comme le peintre et le plâtrier, peut-être moins à l'aise avec le sujet* » (Archi. 1).

Le BIM apparaît ainsi comme « *vraiment quelque chose qui demande de l'énergie* » (Archi 2.), induisant des surcoûts et donc des questions de rentabilité. « *C'est de l'énergie à mettre à la base pour que le projet soit bien conçu. (...) A un moment donné si tu veux être rentable (...) le temps reste de l'argent et sur des petits projets ce n'est pas viables.* » (Archi. 2). La taille des projets apparaît ainsi comme un élément déterminant dans le recours à l'utilisation du BIM, avec la nécessité de proportionner les moyens aux objectifs. Le BIM apparaît plus adapté à des grands projets structurants, mobilisant de très gros budget, tant parce qu'il constitue une réponse aux défis de complexité de ces projets que parce que les budgets mobilisés permettent de mobiliser les compétences nécessaires à sa mise en œuvre. Le développement du BIM semble aussi corrélé à des dynamiques de « *recherche de subventions* » (Archi. 2) par des collectivités qui souhaitent pleinement utiliser les leviers d'action dont elles disposent pour contribuer au développement des Bâtiments Intelligents.

2.6 Les actions des autorités publiques restent encore limitées et souvent expérimentales

En France, les collectivités locales sont encore au stade de l'expérimentation des jumeaux numériques avec quelques projets « pionniers » faisant l'objet d'une certaine visibilité médiatique (Banque des Territoires 2021). Toutefois, comme le relève la Banque des Territoires dans son étude, aucun de ces jumeaux n'est « complet » (Banque des Territoires 2021, 5) : « de nombreux cas d'usage [restant] à explorer, tant les possibilités offertes sont larges, notamment dans le champ de la modélisation et de la simulation ». En pratique, plusieurs niveaux de modélisation territoriale, et donc de CIM, se dessinent depuis l'intégration ponctuelle de données 3D dans les SIG jusqu'à des plateformes de données collaboratives, proposant des outils de restitution en 3D ou 4D (intégration de la dimension temporelle), plus ambitieuses et ouvertes sur tout un territoire. L'intégration CIM – BIM n'en est donc qu'à ses débuts, malgré son immense potentiel. Le recours à la modélisation 3D pour servir de support à la communication sur les projets d'aménagement et d'outil de dialogue, voir de co-construction des futurs espaces et bâtiments publics, semble toutefois plus accessible aux collectivités. Les entretiens réalisés auprès d'un Etablissement Public de Coopération Intercommunal (EPCI) de 130 000 habitants engagé dans d'importantes opérations de renouvellement urbain ont ainsi mis en évidence les vertus de la médiation et de l'accompagnement au changement des technologies 3D lors de la construction d'une nouvelle ligne de bus à haut niveau de service, nécessitant de procéder à un certain nombre de réalignements parcellaires. L'appropriation du projet par les habitants a été permise grâce à un important travail de dialogue sur la base de restitutions 3D permettant aux acteurs de se projeter dans les aménagements futurs. De même, les technologies 3D ont été mobilisées pour travailler plus spécifiquement sur l'aménagement architectural et paysager de la place centrale d'un nouveau quartier en cours de construction, ainsi que de proposer aux habitants de visiter virtuellement, grâce aux technologies de réalité augmentée, les nouveaux bâtiments appelés à être construits. Cette dynamique constitue le point de départ d'une démarche CIM – BIM puisque l'ambition affichée par cet EPCI est d'intégrer les données issues des maquettes BIM pendant et à l'issue de la phase de construction, pour garantir le niveau de mise à jour de son jumeau numérique en cours de constitution.

Concernant plus spécifiquement le BIM, les collectivités locales sont également au stade de l'expérimentation à la faveur de la mise en œuvre de la loi ELAN. Plusieurs appels à projet ont ainsi été lancés dans le cadre du Plan BIM, avec pour objectif de renforcer le niveau d'implantation de cette technologie dans les processus de construction, et en s'interrogeant notamment sur les référentiels qualité à mobiliser pour positionner de manière centrale la maquette BIM dans les processus d'instruction des autorisations d'urbanismes. Ces projets mobilisent à la fois des opérateurs privés et

des collectivités locales. De premières conclusions sont attendues pour la fin de l'année 2021⁶. A ce stade de nos travaux exploratoires, nous n'avons pas identifié de résultats ni d'étude sur les dynamiques croisées Bâtiments intelligents – Ecosystèmes de Villes et Territoires intelligents. Parmi les voies d'étude possible, un focus pourrait être réalisé sur les plateformes de données territoriales qui se mettent en place, pour appréhender dans quelles mesures celles-ci peuvent être alimentées par des jeux de données directement issus des objets connectés déployés dans des bâtiments intelligents.

Enfin, nous avons relevé, en croisant les sources secondaires (Banque des Territoires 2021) et nos entretiens exploratoires, combien les démarches de CIM et de BIM ne peuvent être envisagées que dans le cadre plus global de la digitalisation des processus des collectivités locales et du management des données à l'échelle d'un territoire. Les enjeux en termes de transformation de la gouvernance vers des formes plus proactives et plus ouvertes, de transformation organisationnelle, ainsi que de définition de nouvelles modalités de co-création de valeur avec les parties prenantes d'un territoire identifiés pour les politiques de Villes et de Territoires Intelligents (Frucquet et al. 2021) sont pleinement à prendre en compte. C'est en ce sens que Lopez (2017) considère le BIM comme un moteur du changement pour les organisations publiques. Dernier point évoqué de manière récurrente dans nos entretiens, rejoignant la préconisation de proportionnalité des moyens aux objectifs formulée par la Banque des Territoires (2021) : les coûts financiers, d'investissement puis d'exploitation, ainsi que les ressources humaines à mobiliser. L'animation des cercles vertueux de co-création de valeur au travers des objets connectés et des démarches BIM passe en effet par l'existence d'un leadership qui relève de la gouvernance politique et stratégique, mais aussi de compétences opérationnelles de type *BIM Manager*. Les politiques de gestion des ressources humaines sont alors impactées.

Conclusion

L'objet de cette communication était de s'interroger sur les facteurs limitatifs et incitatifs au déploiement des Bâtiments Intelligents dans une dynamique d'intégration et d'interaction avec les politiques de Villes et de Territoires Intelligents dont le développement va croissant.

Dans un premier temps, la revue de littérature nous a permis d'élaborer un modèle de recherche exploratoire structuré autour de cinq facteurs, trois facteurs limitatifs et deux facteurs incitatifs. Le travail d'exploration empirique que nous avons conduit nous amène finalement à identifier une douzaine de facteurs explicatifs du développement (ou du faible développement) du BIM et de l'IoT au service de Bâtiments Intelligents dialoguant avec des écosystèmes Villes et Territoires Intelligents.

Nous identifions ainsi sept facteurs limitatifs récurrents : 1) le cloisonnement des acteurs, 2) le niveau d'interopérabilité entre les technologies proposées, 3) le degré d'industrialisation des acteurs du BTP, 4) le degré d'acculturation au numérique des acteurs du BTP, 5) les coûts en matière de ressources humaines et financières pour assurer la coordination, 6) le degré d'acculturation au numérique des utilisateurs finaux, 7) les risques perçus en matière de sécurité (cybersécurité, continuité de service électrique).

Les facteurs incitatifs que nous avons mis en évidence sont d'une part endogènes à la filière BTP et à ses relations avec ses clients finaux. Ils sont, d'autre part, exogènes, relevant de la capacité à agir des

⁶ <https://plan-bim-2022.fr/le-bim-est-une-realite/> consulté le 22 nov. 2021

autorités publiques sur un territoire et de la capacité et d'enjeux supérieurs en termes de développement durable. Pour les facteurs incitatifs endogènes, nous identifions ainsi deux facteurs récurrents : 1) valeur ajoutée de l'expérience utilisateur, 2) performance organisationnelle et financière. Pour les facteurs incitatifs relevant de l'effet levier dont disposent les autorités locales et de dynamiques d'intérêt général, nous avons observé 3 facteurs incitatifs : 1) les dispositions réglementaires, 2) la conduite de politiques publiques de Villes et de Territoires Intelligents, 3) le développement de plateformes de données territoriales agrégeant les données produites par les acteurs publics et privés. De manière commune aux deux catégories de facteurs incitatifs, la question de la gouvernance et du *leadership* de ces démarches est posée de manière granulaire depuis les Maisons et les Bâtiments Intelligents aux Quartiers puis aux Villes et Territoires Intelligents. Ces enjeux sont particulièrement forts pour entrer collectivement dans une dynamique de co-création de valeur, mais aussi organiser concrètement sa mesure et son partage dans le cadre des relations contractuelles qui régissent les relations entre les différents acteurs (Toli et al., 2020).

Ces travaux constituent une contribution exploratoire à la littérature sur les *Smart Buildings* et les relations entre *Smart Buildings* et *Smart Cities*. Deux limites, et donc deux prolongements peuvent être identifiés. D'une part, la revue de littérature a été conduite de manière traditionnelle, en ciblant les publications qui apparaissaient pertinentes au regard de la question de recherche, mais sans recourir aux méthodologies structurées des revues systématiques de littérature. Ces sujets étant encore peu étudiés par les Sciences de Gestion, la mise en œuvre d'une revue systématique de littérature sur le thème « *Smart Building* et *Smart Cities* » pourrait constituer un nouveau socle de travail de nature à faire progresser les connaissances en ce domaine. D'autre part, la taille de l'échantillon ne nous a pas permis d'identifier avec finesse le degré de contribution de chacun des facteurs limitatifs et incitatifs au développement du BIM et de l'IoT au service de l'intégration entre *Smart Buildings* et *Smart Cities*. Ce travail reste à conduire. Il peut être intéressant de prolonger la dynamique d'entretiens semi-directifs engagée pour préparer cette communication et de la compléter par des études de cas ciblées. Cette démarche pourrait utilement être enrichie par une recherche quantitative, sur la base d'un questionnaire à destination des acteurs du BTP et des organisations publiques étatiques ou locales. Au-delà des enjeux scientifiques, l'enjeu est de pouvoir apporter aux acteurs publics comme privés des préconisations opérationnelles de nature à contribuer à améliorer le développement des *Smart Buildings* ainsi que leur intégration dans des politiques de *Smart Cities* centrées sur les usages et coconstruites avec les acteurs des territoires.

Bibliographie

- Akanmu, A., & Anumba, C. J. (2015). Cyber-physical systems integration of building information models and the physical construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22 (5), 516-535. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2014-0097>
- Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N., & Leonforte, F. (2020). Smart buildings features and key performance indicators: A review. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102328. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328>
- Alwan, A. A., Baravalle, A., Ciupala, M. A., & Falcarin, P. (2018, September). An Open Source Software Architecture for Smart Buildings. In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*(pp. 160-169). Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-01057-7_14.
- Apanaviciene, R., Vanagas, A., & Fokaides, P. A. (2020). Smart building integration into a smart city (SBISC): Development of a new evaluation framework. *Energies*, 13(9), 2190. <https://doi.org/10.3390/en13092190>
- Agbali, M., Trillo, C., Ibrahim, I. A., Arayici, Y., & Fernando, T. (2019). Are smart innovation ecosystems really seeking to meet citizens' needs? Insights from the stakeholders' vision on smart city strategy implementation. *Smart Cities*, 2(2), 307-327. <https://doi.org/10.3390/smartcities2020019>
- Azevedo Guedes, A. L., Carvalho Alvarenga, J., Dos Santos Sgarbi Goulart, M., Rodriguez y Rodriguez, M. V., & Pereira Soares, C. A. (2018). Smart cities: The main drivers for increasing the intelligence of cities. *Sustainability*, 10(9), 3121. <https://doi.org/10.3390/su10093121>
- Ajzen, I., & Fishbein, M. (1975). A Bayesian analysis of attribution processes. *Psychological bulletin*, 82(2), 261. <https://doi.org/10.1037/h0076477>
- Ajzen, I. 1991. The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50: 179–211 [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Banque des Territoires. 2021. « Miroir, miroir ... : le jumeau numérique du territoire ». Banque des Territoires <https://www.banquedesterritoires.fr/miroir-miroir-le-jumeau-numerique-du-territoire-0>
- Bottaccioli, L., Aliberti, A., Ugliotti, F., Patti, E., Osello, A., Macii, E., & Acquaviva, A. (2017, July). Building energy modelling and monitoring by integration of IoT devices and building information models. In *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)* (Vol. 1, pp. 914-922). IEEE. DOI: [10.1109/COMPSAC.2017.75](https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2017.75)
- Chen, X., Shi, Q., Yang, L., & Xu, J. (2018). ThriftyEdge: Resource-efficient edge computing for intelligent IoT applications. *IEEE network*, 32(1), 61-65. DOI: [10.1109/MNET.2018.1700145](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700145)
- Corno, F., De Russis, L., & Montanaro, T. (2019). XDN: cross-device framework for custom notifications management. *Computing*, 101(11), 1735-1761 <https://doi.org/10.1007/s00607-018-0686-6>
- Davis F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, (13), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- D'Elia, A., Roffia, L., Zamagni, G., Vergari, F., Bellavista, P., Toninelli, A., & Mattarozzi, S. (2010, June). Smart applications for the maintenance of large buildings: How to achieve ontology-based

- interoperability at the information level. In The IEEE symposium on Computers and Communications (pp. 1077-1082). IEEE <https://doi.org/10.1109/ISCC.2010.5546639>
- De Groote, M., Volt, J., & Bean, F. (2017). Smart buildings decoded. Building performance institute Europe. http://bpie.eu/wp-content/uploads/2017/06/PAPER-Smart-buildings-decoded_05.pdf.
- Emmerich, Sarah. 2020. *La smart city en 10 questions : comprendre les nouveaux enjeux numériques urbains*. Territorial Editions. Les Essentiels.
- European Construction Sector Observatory. 2019. « Building Information Modelling in the EU construction sector ». European Commission.
- Ewert, M., Brodowicz, D. P., & Pospieszny, P. (2018). Artificial Intelligence and machines: A curse or blessing for corporate real estate?. *Corporate Real Estate Journal*, 7(4), 337-351.
- Feenberg, A. (2019). The Internet as network, world, co-construction, and mode of governance. *The Information Society*, 35(4), 229-243. <https://doi.org/10.1080/01972243.2019.1617211>
- Fokaides, P. A., Apanaviciene, R., & Klumbyte, E. (2018). 5.12 Energy Management in Smart Cities.
- Frucquet, Pascal, Pierre Marin, David Carassus, et Didier Chabaud. 2021. « L’Influence des politiques publiques de Villes et Territoires Intelligents sur la rénovation de la gouvernance locale ». *Politiques et Management Public*, n° 38/3-4, Juillet-Décembre 2021
- Gonzalez, P. A., & Zamarreno, J. M. (2005). Prediction of hourly energy consumption in buildings based on a feedback artificial neural network. *Energy and buildings*, 37(6), 595-601 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.006>
- Han, M. J. N., Kim, M. J., & Kim, I. H. (2021). Exploring the user performance of Korean women in smart homes with a focus on user adoption. *Journal of Building Engineering*, 39, 102303.
- Heaton, James, et Ajith Kumar Parlikad. 2019. « A Conceptual Framework for the Alignment of Infrastructure Assets to Citizen Requirements within a Smart Cities Framework ». *Cities* 90 (juillet): 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.041>.
- Im, J., & Hancer, M. (2017). What fosters favorable attitudes toward using travel mobile applications?. *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 26(4), 361-377. <https://doi.org/10.1080/19368623.2017.1248805>
- Jia, M., Komeily, A., Wang, Y., & Srinivasan, R. S. (2019). Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction*, 101, 111-126. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.023>
- Jing, Q., Vasilakos, A. V., Wan, J., Lu, J., & Qiu, D. (2014). Security of the Internet of Things: perspectives and challenges. *Wireless Networks*, 20(8), 2481-2501. <https://doi.org/10.1007/s11276-014-0761-7>.
- Joensuu, T., Edelman, H., & Saari, A. (2020). Circular economy practices in the built environment. *Journal of cleaner production*, 124215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124215>
- Jourdan, M., Meyer, F., & Bacher, J. P. (2019, November). Towards an integrated approach of building-data management through the convergence of Building Information Modelling and Internet of Things. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1343, No. 1, p. 012135). IOP Publishing.

Kelly, S. D. T., Suryadevara, N. K., & Mukhopadhyay, S. C. (2013). Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes. *IEEE sensors journal*, 13(10), 3846-3853. DOI: [10.1109/JSEN.2013.2263379](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2263379)

Lee, C. K., Chan, H. Y. S., Poon, C. Y. C., Yip, K. M. G., & Yuen, P. H. F. (2019, June). Smart BIM-AM journey to green buildings. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*(Vol. 290, No. 1, p. 012050). IOP Publishing. . <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012050>.

Lee, B., & Cranage, D. A. (2018). Causal attributions and overall blame of self-service technology (SST) failure: Different from service failures by employee and policy. *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 27(1), 61-84. <https://doi.org/10.1080/19368623.2017.1337539>

Liu, Zhen, Ziyuan Chi, Mohamed Osmani, et Peter Demian. 2021. « Blockchain and Building Information Management (BIM) for Sustainable Building Development within the Context of Smart Cities ». *Sustainability* 13 (4): 2090. <https://doi.org/10.3390/su13042090>.

Lopez, Angel Esteve. 2017. « BIM as a change drive un public organizations ». In , 169-75. Alicante, Spain. <https://doi.org/10.2495/BIM170161>

Kiliccote, S., Piette, M. A., & Ghatikar, G. (2011, November). Smart buildings and demand response. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1401, No. 1, pp. 328-338). American Institute of Physics <https://doi.org/10.1063/1.3653861>

Malagnino, A., Montanaro, T., Lazoi, M., Sergi, I., Corallo, A., & Patrono, L. (2021). Building information modeling and Internet of Things integration for smart and sustainable environments: A review. *Journal of Cleaner Production*, 127716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127716>

Minvielle N. et Wathelet O. (2020), « Smart City : d'autres imaginaires existent pour une ville intelligente », *The Conversation*, 23 avril 2020, www.theconversation.com

Mynhoff, P. A., Mocanu, E., & Gibescu, M. (2018, September). Statistical learning versus deep learning: performance comparison for building energy prediction methods. In *IEEE PES innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-6).

F. Mofidi, H. Akbari, (2020). “Intelligent buildings: An overview”. *Energy and Buildings*, Volume 223, 2020, 110192, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110192>.

Mosannenzadeh, F., & Vettorato, D. (2014). Defining smart city. A conceptual framework based on keyword analysis. *TeMA-Journal of Land Use, Mobility and Environment*. DOI: <https://doi.org/10.6092/1970-9870/2523>

Nam, T., & Pardo, T. A. (2011, June). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. In *Proceedings of the 12th annual international digital government research conference: digital government innovation in challenging times* (pp. 282-291) [https://doi.org/10.1145/2037556.2037602`](https://doi.org/10.1145/2037556.2037602)

Nesti, Giorgia. 2020. « Définir et évaluer la nature transformationnelle de la gouvernance des villes intelligentes : observations issues de quatre cas européens ». *Revue Internationale des Sciences Administratives* 86 (1): 23. <https://doi.org/10.3917/risa.861.0023>

Osborne, Stephen P., et Kirsty Strokosch. 2013. « It Takes Two to Tango? Understanding the Co-Production of Public Services by Integrating the Services Management and Public Administration

Perspectives: It Takes Two to Tango? » *British Journal of Management* 24 (septembre): S31-47. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.12010>.

Pal, D., Zhang, X., & Siyal, S. (2021). Prohibitive factors to the acceptance of Internet of Things (IoT) technology in society: A smart-home context using a resistive modelling approach. *Technology in Society*, 66, 101683. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101683>

Patrono, L., Atzori, L., Šolić, P., Mongiello, M., & Almeida, A. (2020). Challenges to be addressed to realize Internet of Things solutions for smart environments, 111, 873-87. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.033>

Picon, Antoine. 2015. *Smart Cities, A Spatialised Intelligence*. Chichester, UK: Wiley.

Rogers, E.M. (2003). *Diffusion of innovations*. Fifth edition. New York: Free Press.

Rutishauser, U., J. Joller, and R. Douglas. 2005. "Control and Learning of Ambience by An Intelligent Building." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans* 35 (1): 121–132. DOI: [10.1109/TSMCA.2004.838459](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2004.838459)

Sadowski, J. (2020). The internet of landlords: Digital platforms and new mechanisms of rentier capitalism. *Antipode*, 52(2), 562-580. <https://doi.org/10.1111/anti.12595>

Sava, G. N., Pluteanu, S., Tanasiev, V., Patrascu, R., & Necula, H. (2018, June). Integration of BIM solutions and IoT in smart houses. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494628>.

A. S. Shah, N. Haidawati, M. Fayaz, A. Lajis, (2019). "A Review on Energy Consumption Optimization Techniques in IoT Based Smart Building Environment". *Information* 2019, 10, 108. DOI: [10.3390/info10030108](https://doi.org/10.3390/info10030108).

Sharifi, A., Khavarian-Garmsir, A. R., & Kummitha, R. K. R. (2021). Contributions of Smart City Solutions and Technologies to Resilience against the COVID-19 Pandemic: A Literature Review. *Sustainability*, 13(14), 8018. <https://doi.org/10.3390/su13148018>

Sinopoli, J., & Sinopoli, J. (2010). What is a smart building? Smart building systems for architects, owners and builders 1–5. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-653-8.00001-6>.

Souza, Letícia, et Cristiane Bueno. 2022. « City Information Modelling as a Support Decision Tool for Planning and Management of Cities: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis ». *Building and Environment* 207 (janvier): 108403. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108403>.

Stubbings, M. (1988), *Intelligent Buildings: An IFS Executive Briefing*, Springer-Verlag, Berlin.

Srinivasan, D., Rajgarhia, S., Radhakrishnan, B. M., Sharma, A., & Khincha, H. P. (2017). Game-Theory based dynamic pricing strategies for demand side management in smart grids. *Energy*, 126, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.142>

Strohbach, M., Ziekow, H., Gazis, V., & Akiva, N. (2015). Towards a big data analytics framework for IoT and smart city applications. In *Modeling and processing for next-generation big-data technologies* (pp. 257-282). Springer, Cham. DOI: [10.1007/978-3-319-09177-8_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09177-8_11)

Trope, Y., & Liberman, N. (2010). Construal-level theory of psychological distance. *Psychological review*, 117(2), 440-463.

- Venkatesh, V., Thong, J. Y., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS quarterly*, 157-178. <https://doi.org/10.2307/41410412>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478 <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Wang, Z., Wang, L., Dounis, A. I., & Yang, R. (2012). Integration of plug-in hybrid electric vehicles into energy and comfort management for smart building. *Energy and Buildings*, 47, 260-266. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.11.048>.
- White, Gary, Anna Zink, Lara Codecá, et Siobhán Clarke. 2021. « A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback ». *Cities* 110 (mars): 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>.
- Wong, J. K. W., & Li, H. (2009). Development of intelligence analytic models for integrated building management systems (IBMS) in intelligent buildings. *Intelligent Buildings International*, 1(1), 5-22. <https://doi.org/10.3763/inbi.2009.0011>.
- Yang, H., Lee, H., & Zo, H. (2017). User acceptance of smart home services: an extension of the theory of planned behavior. *Industrial Management & Data Systems*. 117 (2017) 68-89, <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2016-0017>.
- Yu, Jiang, Yating Wen, Jing Jin, et Yue Zhang. 2019. « Towards a Service-Dominant Platform for Public Value Co-Creation in a Smart City: Evidence from Two Metropolitan Cities in China ». *Technological Forecasting and Social Change* 142 (mai): 168-82. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.017>.
- Zaballos, A., Briones, A., Massa, A., Centelles, P., & Caballero, V. (2020). A smart campus' digital twin for sustainable comfort monitoring. *Sustainability*, 12(21), 9196 <https://doi.org/10.3390/su12219196>
- Zhao, Z., Gao, Y., Hu, X., Zhou, Y., Zhao, L., Qin, G., ... & Han, D. (2019, December). Integrating BIM and IoT for smart bridge management. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 371, No. 2, p. 022034). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022034>.