

# Projet PULSAR – UA



## BEBAC

### Bilan Environnemental des BÂtiments Connectés

## Rapport scientifique



Marie-Lise Pannier

LARIS – 62 Avenue Notre Dame du Lac, 49 000 Angers

marie-lise.pannier@univ-angers.fr

Angers, le 28 janvier 2023



## Résumé

Le présent rapport scientifique décrit les résultats obtenus dans le cadre du projet BEBAC (Bilan Environnemental des BÂtiments Connectés), cofinancé par la Région des Pays de la Loire, au travers du dispositif PULSAR, et par l'Université d'Angers, au travers d'un appel à projet interne.

Le dispositif PULSAR et l'appel à projet interne de l'Université d'Angers visent à aider les chercheurs et enseignants-chercheurs en début de carrière. Avec BEBAC, Marie-Lise Pannier, recrutée en tant que maître de conférences à l'Université d'Angers en septembre 2019, a bénéficié, du 1<sup>er</sup> mai 2020 au 31 décembre 2022, d'un mentorat et d'un accompagnement financier à hauteur de 21 000 € (10 500 € provenant de la Région et 10 500 € de l'Université d'Angers).

Le projet BEBAC avait pour objectif de comparer les impacts environnementaux de bâtiments connectés et de leurs équivalents non connectés. Si l'ensemble de capteurs et d'actionneurs, installés dans les bâtiments connectés, doivent permettre une réduction des consommations d'énergie en phase d'exploitation, tout en satisfaisant au confort des occupants, il s'agissait de vérifier que ces composants ne causent pas davantage d'impacts environnementaux sur le cycle de vie complet du bâtiment. Les rares articles traitant du sujet avant le démarrage du projet n'étaient pas unanimes quant aux bénéfices réels des bâtiments connectés (selon les objets connectés installés et la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment) et ne permettaient pas d'avoir une vision globale de leurs impacts environnementaux (études parfois monocritère, non prise en compte des incertitudes de modélisation).

Afin d'évaluer plus précisément les impacts environnementaux de bâtiments connectés, une démarche d'analyse de cycle de vie (ACV) a été appliquée. Plusieurs variantes de bâtiments connectés ont été proposées et comparées à un bâtiment non connecté. L'originalité du projet réside dans la comparaison entre les bâtiments connectés et non connectés à l'aide d'ACV dynamiques, multicritères, intégrant toutes les étapes du cycle de vie des bâtiments, et en prenant en compte de nombreuses sources d'incertitudes pesant sur la modélisation environnementale.

Les résultats des ACV comparatives mises en œuvre montrent que les variantes connectées restent globalement favorables sur le plan environnemental, et ce malgré les incertitudes pesant sur la modélisation. Dans de rares cas, la variante connectée engendre des impacts plus importants sur l'eutrophisation ou l'épuisement des ressources minérales. Une rénovation énergétique permet des gains environnementaux plus importants que la mise en place de capteurs et d'actionneurs connectés. L'intérêt des bâtiments connectés décroît pour des bâtiments plus performants énergétiquement. Les résultats de BEBAC ont été valorisés auprès de la communauté de chercheurs en ACV et en thermique du bâtiment, mais également auprès du grand public.

Grâce à l'accompagnement financier, deux stagiaires ont pu être recrutés pour contribuer à certains des axes du projet mentionnés ci-dessus ; offrant ainsi à la porteuse du projet de premières expériences en encadrement de stages. De plus, le support financier et le mentorat ont permis à la

bénéficiaire de nouer (ou de renouer) des contacts avec des collègues chercheurs, à des échelles locales, nationales et internationales. Ces échanges ont utilement nourri le projet, en permettant de mieux définir les cas d'étude, et en affinant certaines hypothèses sur les capteurs connectés. BEBAC a ainsi constitué un tremplin pour la bénéficiaire. Dans la continuité de ce projet, des réponses à des appels à projet nationaux et internationaux sont en train d'être déposées.

NB : le présent rapport de projet est rédigé sur la base des rapports de stage de Thomas Remoué (Remoué 2009) et de Clémence Lagarde (Lagarde 2022), et de l'article de conférence LCM2021 (*Life Cycle Management*) (Pannier, Remoué, et Bigaud 2022).

---

# Sommaire

<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>5</b>
<b>Éléments de synthèse .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Contexte .....</b>	<b>11</b>
<b>2. État de l'art .....</b>	<b>13</b>
2.1. Démarche d'évaluation des impacts environnementaux pour des bâtiments connectés .....	13
2.2. Types de bâtiments étudiés .....	13
2.3. Dispositifs connectés et stratégies d'optimisation de la consommation associées .....	15
2.4. Quantification des impacts environnementaux .....	15
2.5. Résultats des études .....	17
<b>3. Positionnement du problème traité dans BEBAC .....</b>	<b>20</b>
<b>4. Méthodes et outils .....</b>	<b>22</b>
4.1. Définition des variantes à comparer .....	22
4.2. Description des objets connectés .....	23
4.3. Description du bâtiment .....	24
4.4. Bilan énergétique et ACV des variantes .....	25
4.5. Comparaison de variantes d'ACV en présence d'incertitudes .....	26
<b>5. Cas d'étude .....</b>	<b>27</b>
5.1. Cas d'étude 1 .....	27
5.2. Cas d'étude 2 .....	30
<b>6. Résultats .....</b>	<b>35</b>
6.1. Base de données sur les capteurs connectés .....	35
6.2. Résultats du cas d'étude 1 .....	37
6.3. Résultats du cas d'étude 2 .....	40

<b>7. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>45</b>
7.1. Conclusions .....	45
7.2. Perspectives / retombées .....	47
<b>Bibliographie .....</b>	<b>51</b>

## Éléments de synthèse

DONNEES GENERALES	
Porteuse de projet	Marie-Lise Pannier (LARIS, Université d'Angers)
Démarrage du projet	01/05/2020
Fin de projet	31/12/2022
Financement	Région Pays de la Loire, dispositif PULSAR : 10 500 € Université d'Angers : 10 500 €
Sujet	Bilan Environnemental des BÂtiments Connectés

PARTICIPANTS AU PROJET	
Partenaire du projet	David Bigaud (LARIS, Université d'Angers)
Mentor	Thierry Lemenand (LARIS, Université d'Angers)
Stagiaire du 25/05/2021 au 16/07/2021	Thomas Remoué (4 <sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur : M1, à Polytech Annecy-Chambéry de l'Université Savoie Mont Blanc) : étude bibliographique, constitution d'une base de données environnementales sur les objets connectés
Stagiaire du 07/02/2022 au 05/08/2022	Clémence Lagarde (5 <sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur : M2, à l'INSA de Strasbourg) : étude bibliographique, gestion des incertitudes sur les objets connectés, étude de cas sur la comparaison de bâtiments connectés et non connectés <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtention du <b>Prix Roger Cadiergues 2022</b>, catégorie meilleur « Projet de fin d'études », décerné par l'Association des Ingénieurs et Techniciens en Climatique Ventilation et Froid le 12/01/2023</li> </ul>

ACTIONS DE VALORISATION SCIENTIFIQUE	
Conférence Life Cycle Management (LCM) 2021 à Stuttgart	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 08/09/2021 : <b>Présentation orale</b> lors de la conférence</li> <li>• Publication d'un <b>article open source</b> suite à la conférence : M.-L. Pannier, T. Remoué, D. Bigaud, <i>Stochastic comparative LCA of smart buildings</i>, E3S Web of Conferences, (2022). <a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234904012">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234904012</a></li> </ul>
Journée thématique de la Société Française de Thermique 2022 à Paris	06/10/2022 : <b>Présentation orale</b> lors de la journée thématique de la SFT sur les « Systèmes énergétiques et bâtiments : applications, usages et optimisations »
Publication d'un article de revue	Article en cours de préparation pour soumission dans une revue scientifique. Revues envisagées : <i>Journal of Industrial Ecology</i> de Wiley (possibilité de publication en <i>Open Source</i> gratuitement dans le cadre de l'accord avec l'Université d'Angers), ou <i>Energy and Buildings</i>

ACTIONS DE VALORISATION GRAND PUBLIC	
Semaine innovation 2021	04/11/2021 : <b>Présentation</b> du projet (et d'autres sujets autour du bâtiment connecté) dans le cadre de la <b>Semaine de l'innovation</b> de l'Université d'Angers : <a href="https://www.univ-angers.fr/fr/recherche/actualites/actualites-2021/semaine-de-l-innovation.html">https://www.univ-angers.fr/fr/recherche/actualites/actualites-2021/semaine-de-l-innovation.html</a>
Médiation scientifique : Fête de la science 2022	15 et 16/10/2022 : <b>Présentation</b> des résultats du projet (et d'autres sujets autour du bâtiment connecté) lors de la <b>Fête de la Science</b> à Angers (Village des sciences d'Angers sur le campus de l'ESEO) : <a href="https://fetedelascience-paysdelaloire.fr/maine-et-loire/batiments-intelligents-des-capteurs-connectes-pour-le-confort-et-les-economies-denergie/">https://fetedelascience-paysdelaloire.fr/maine-et-loire/batiments-intelligents-des-capteurs-connectes-pour-le-confort-et-les-economies-denergie/</a>
Médiation scientifique : Intervention dans une émission de radio	15/10/2022 : <b>Présentation</b> du projet (et d'autres sujets autour du bâtiment connecté) lors d'une émission radio de <b>Radio Campus</b> réalisée dans le cadre de la Fête de la Science : <a href="https://www.radiocampusangers.com/emission/fete-de-la-science/">https://www.radiocampusangers.com/emission/fete-de-la-science/</a>

IMPACTS SUR LA CARRIERE	
Expérience	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En gestion de projet</li> <li>• En encadrement de stagiaires</li> </ul>
Réseau local	Développement du réseau localement : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Début de collaboration avec Alain Godon (Polytech Angers, Université d'Angers) et Franck Mercier (LARIS, Université d'Angers) : portage du projet <b>ACQA</b> (Acquisition et Caractérisation de la Qualité de l'Air) de l'appel à manifestation d'intérêt <b>Sciences Participatives 2022</b> de l'Université d'Angers</li> <li>• Début de collaboration avec deux doctorants, Rima Al Aridi (LARIS, Université d'Angers) et Bassel Chokr (LARIS, Université d'Angers), sur le traitement de données de capteurs connectés : participation commune à l'école chercheur <b>DATASUN 2022</b></li> </ul>
Réseau national	Développement du réseau nationalement : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Suite de collaboration avec la société Kocliko, renforcé avec le portage de projet de l'<b>ANR Plan de Relance CoLoC</b> (Confort des Logements Connectés)</li> <li>• Lien avec la communauté IBPSA France :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Participation à la conférence IBPSA France 2022 à Châlons-en-Champagne</li> <li>○ <b>Organisation</b> d'un <b>webinaire</b> IBPSA France sur l'ACV des bâtiments prévu au printemps 2023</li> </ul> </li> </ul>
Réseau international	Développement du réseau internationalement : <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Rapportrice</b> de la <b>thèse</b> d'Alina Galimshina, « <i>Robust and reliable building renovation strategies for environmental and economic performance</i> », soutenue le 27/01/2022 à l'ETH Zurich (Suisse)</li> </ul>

---

PRC AAPG2023 de l'ANR	07/11/2022 : Dépôt du <b>PRC SUBSTANCE</b> ( <i>SUBSTitution of sANd by f-waste in ConcretE</i> ), étape 1 avec les laboratoires CERTES de l'Université Paris Est Créteil (portage du projet), I-CUBE de l'Université de Strasbourg et l'Université Gustave Eiffel
PRCI AAPG2023 de l'ANR	07/11/2022 : Dépôt du <b>PRCI ECOPICO</b> (ECOconception de bâtiments sous Prospective et Incertitudes COuplées), étape 1 avec les laboratoires CES de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (portage du projet) et, LESBAT de Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (Suisse).
Appel à projet « Post-Doc UPEC 2023 »	16/01/2023 : Réponse à l'appel à projet « <b>Post-Doc UPEC 2023</b> » avec Ons Hamdaoui (CERTES, Université Paris-Est Créteil, portage du projet) et Laurent Ibos (CERTES, Université Paris-Est Créteil) pour 12 mois de post-doc sur « l'Étude comparative de l'influence des modes constructifs sur l'analyse de cycle de vie des bâtiments »



# 1. Contexte

En réponse aux transitions énergétique et numérique du secteur du bâtiment, le concept de Bâtiment intelligent ou de bâtiment connecté (*Smart building*) se développe. Un bâtiment connecté intègre un réseau d'objets connectés permettant de suivre et/ou réguler en temps réel un ensemble de paramètres caractéristiques d'un bâtiment. La gestion optimisée de ces bâtiments doit permettre une réduction des coûts et consommations énergétiques en phase d'exploitation, ainsi qu'une amélioration du confort des usagers. En exploitant les données recueillies par les capteurs, il est possible :

- d'étudier les usages d'un bâtiment (présence et activité des occupants, consommations énergétiques) (Amayri et al. 2020) et les préférences en termes de confort des usagers ;
- de reconstruire des séries temporelles représentatives de l'usage de types de bâtiments (Amayri et al. 2020; Schalbart et al. 2021) et donc d'améliorer la prédiction de la performance ;
- d'informer les occupants sur les conséquences de leurs actions sur leurs consommations (Bavaresco et al. 2019) pour provoquer une prise de conscience voire un changement des habitudes ;
- de piloter en temps réel les équipements techniques (Robillart et al. 2017; Reynolds et al. 2018) afin de minimiser les consommations ou les coûts d'exploitation. Leur facilité de mise en œuvre et leur coût d'installation modéré en font une solution technique intéressante pour améliorer les performances énergétiques d'un bâtiment.

Ces dispositifs connectés permettent alors de maîtriser, anticiper, lisser et réduire la demande énergétique du bâtiment en phase d'exploitation. Cependant, compter sur l'exploitation d'un nombre croissant de technologies numériques pour générer des économies d'énergie porte à débat. Plusieurs éléments sont mis en cause, parmi eux : la consommation électrique des objets connectés en phase d'usage; les consommations d'énergie liées au stockage des données sur des serveurs; la dépendance aux métaux rares; les conséquences environnementales de l'extraction des métaux rares; les conséquences environnementales du traitement des déchets électroniques en fin de vie etc. Ainsi, l'utilisation de systèmes de gestion de l'énergie induit un risque de glissement des charges environnementales entre les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment.

Pour évaluer les bénéfices réels des bâtiments intelligents, il convient alors de passer d'une étude sur la phase d'exploitation à une étude sur le cycle de vie complet, et de considérer, outre la consommation de ressources énergétiques, d'autres thématiques environnementales associées au secteur du bâtiment. L'analyse de cycle de vie (ACV) est l'outil de référence pour évaluer les impacts environnementaux d'un système. Il s'agit d'une méthode internationale standardisée dont le but est d'inventorier et de quantifier l'ensemble des flux de matières et d'énergie entrants et sortants d'un système au cours de son cycle de vie ainsi que les impacts environnementaux potentiels (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006). Les ACV permettent d'identifier des options d'amélioration environnementales

d'un produit, ou de choisir, parmi des produits équivalents, celui qui cause le moins d'impact sur l'environnement.

Dans ce projet, des ACV sont menées pour évaluer les impacts environnementaux d'un bâtiment intelligent au cours de son cycle de vie complet, incluant entre autres la fabrication, l'utilisation et la fin de vie de ses capteurs connectés. L'objectif principal de ce projet est de comparer les bilans environnementaux d'un bâtiment intelligent avec ceux d'un bâtiment équivalent, mais à la gestion énergétique non optimisée, afin d'évaluer quelle variante de bâtiment est la plus performante sur le plan environnemental.

Peu d'études se sont attachées à évaluer les impacts environnementaux des bâtiments connectés. La section 2. État de l'art décrit les travaux déjà publiés sur ce sujet et leurs limites. Sur cette base, les objectifs scientifiques de BEBAC sont décrits à la section 3. Positionnement du problème. La démarche de recherche appliquée est présentée à la section 4. Méthodes et outils. Finalement, l'application de la démarche et les réalisations sont présentées à la section 6. Résultats.

Par ailleurs, BEBAC constitue le pendant environnemental du projet BloT (*Building Internet of Things*), financé par le RFI WiSE de la Région Pays de la Loire dans le cadre de son appel à projet attractivité. Alors que BloT a pour but d'optimiser la performance énergétique en usage d'un bâtiment d'enseignement (bureaux et salles de classes), en plaçant l'utilisateur au centre des stratégies de pilotage des systèmes, BEBAC cherche à optimiser la performance environnementale en évaluant par ACV les différentes stratégies de pilotage.

---

## 2. État de l'art

---

*L'état de l'art a été réalisé par Marie-Lise Pannier, puis complété par les deux stagiaires recrutés dans le cadre de BEBAC : Thomas Remoué (stage de M1 en 2021) et Clémence Lagarde (stage de M2 en 2022). Les éléments présentés dans cette partie sont principalement issus du rapport de stage de Clémence Lagarde (2022).*

---

Peu d'études se sont attachées à évaluer les impacts environnementaux de bâtiments connectés. Huit articles traitant du sujet ont été identifiés dans la littérature. Les principales hypothèses de ces articles sont présentées au Tableau 1 et décrits dans les paragraphes suivants. S'ensuit une synthèse des principaux résultats dans le Tableau 2.

### 2.1. Démarche d'évaluation des impacts environnementaux pour des bâtiments connectés

La démarche commune à la plupart des articles est de calculer un temps de retour environnemental. Pour cela, ils considèrent que les ressources extraites et les substances émises tout au long du cycle de vie du produit constituent un « investissement » ou bien une « dette » vis-à-vis de l'environnement. Les études mettent alors en évidence le seuil, exprimé en nombre d'années, à partir duquel les économies réalisées permettent au système de gestion de l'énergie de compenser les impacts qu'il génère. Si le délai de récupération excède la durée de vie des capteurs, alors le dispositif porte globalement préjudice à l'environnement. Pour estimer les impacts évités grâce à la réduction des consommations d'énergie, les articles comparent généralement la performance environnementale d'un bâtiment connecté à celle d'un bâtiment équivalent non connecté.

L'unité fonctionnelle considérée dans les études correspond à l'**utilisation du système de gestion de l'énergie et à la réalisation de gains énergétiques pendant la durée de vie fonctionnelle** de ce dernier. Les articles précédemment publiés ne se plaçaient donc pas à l'échelle du bâtiment connecté complet sur sa durée de vie fonctionnelle, c'est-à-dire que les impacts associés à la fabrication, l'exploitation, les rénovations et la fin de vie du bâtiment lui-même n'étaient pas pris en compte.

### 2.2. Types de bâtiments étudiés

À l'exception de Kumar et Mani (2017), qui s'intéressent à un bâtiment de bureaux, le sujet d'étude de la majorité des articles concerne les **bâtiments résidentiels**. De plus, en dehors des huit articles identifiés sur la performance environnementale de bâtiments connectés, d'autres auteurs se sont intéressés à des sujets connexes tels que la performance environnementale de villes connectées (Ipsen et al. 2019), de stations de métro connectées (Gangoells et al. 2015; 2016), ou les ACV d'objets de gestion énergétique domestiques connectés : hotte de cuisine (Castorani et al. 2018), fenêtre (Pierucci et al. 2018).

**Tableau 1: Principales hypothèses des articles identifiés traitant de bilan environnementaux de bâtiments connectés**

Article	(van Dam, Bakker, et Buitter 2013)	(Louis et al. 2015)	(Beucker, Bergesen, et Gibon 2016)	(Kumar et Mani 2017)	(Louis et Pongrácz 2017)	(Walzberg et al. 2017)	(Scheepens et Vogtländer 2018)	(Walzberg et al. 2020)
<b>Typologie de bâtiment</b>	Maison individuelle	Maison individuelle	Résidentiel collectif	Bureaux	Maison individuelle	Lot de maisons individuelles	Maison individuelle	Lot de maisons individuelles
<b>Localisation</b>	Pays-Bas	Finlande	Multiple	Inde	Finlande	Canada	Pays-Bas	Canada
<b>Optimisation de la consommation de</b>	Electricité	Chauffage et électricité	Chauffage	Eclairage	Chauffage et électricité	Electricité	Chauffage et électricité	Electricité
<b>Réduction des consommations</b>	Entre 2 et 10 %	Pas l'objet de l'article	20 %	Variable selon le type de luminaire	Calculé par STD	Modélisation agents	Calculé par STD	Modélisation agents
<b>Capteurs connectés</b>	Compteurs, prises connectées	Compteurs, thermostat, prises intelligente	Compteurs, thermostat intelligent	Détecteurs de présence	Compteurs, thermostat, prises intelligente	Capteurs et prise intelligents	Compteurs, thermostats intelligents	Capteurs et prise intelligents
<b>Durée de vie des capteurs</b>	5 ans	5 ans	Négligée	10 ans	5 ans	Négligée	15 ans	Négligée
<b>Logiciel d'ACV</b>	Non renseigné	SimaPro	Non renseigné	GaBi 6	SimaPro	Non renseigné	SimaPro	Non renseigné
<b>Base de données</b>	Ecoinvent v2.2	Ecoinvent v3.1	Ecoinvent v2.2	Ecoinvent v3.1 et GaBi 2015	Ecoinvent v3.1	Ecoinvent v3.1 + IEOS + open IQ Canada	ecoinvent + Idemat LCI	Ecoinvent + IEOS + EXIOBASE3
<b>Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie</b>	Non renseignée	ReCiPe 2008	ReCiPe 2008	CML 2001	ReCiPe 2008	Impact 2002+	Non renseignée	Impact 2002+
<b>Indicateurs environnementaux</b>	Consommation cumulée d'énergie primaire = ecocost	Indicateurs de ReCiPe	Indicateurs de ReCiPe	Energie primaire + autres impacts de CML 2001	Indicateurs de ReCiPe	Indicateurs de 2002+	Ecocost value ratio	Emissions de GES

## 2.3. Dispositifs connectés et stratégies d'optimisation de la consommation associées

Les systèmes connectés installés dans les bâtiments des huit études sont composés de capteurs d'ambiance (Beucker et al. 2016; Louis et al. 2015; Louis et Pongrácz 2017), de détecteurs de mouvements (Kumar et Mani 2017), et de compteurs électrique ou de gaz (van Dam et al. 2013; Louis et al. 2015; Louis et Pongrácz 2017). Des actionneurs connectés peuvent compléter le dispositif : prises connectées (van Dam et al. 2013; Louis et al. 2015; Louis et Pongrácz 2017), thermostats et vannes (Louis et al. 2015; Beucker et al. 2016; Louis et Pongrácz 2017; Scheepens et Vogtländer 2018). De plus, des interfaces utilisateurs sont parfois mises en place (van Dam et al. 2013; Louis et al. 2015; Louis et Pongrácz 2017). Ces systèmes connectés ont pour objectifs d'optimiser la consommation pour l'éclairage (Kumar et Mani 2017), la consommation électrique globale (van Dam et al. 2013; Louis et al. 2015; Louis et Pongrácz 2017; Walzberg et al. 2017; Scheepens et Vogtländer 2018; Walzberg et al. 2020), ou encore la consommation pour le chauffage (Louis et al. 2015; Beucker et al.; Louis et Pongrácz 2017; Scheepens et Vogtländer 2018).

En fonction des systèmes connectés installés, deux stratégies d'optimisation de la consommation ressortent de la littérature : le suivi ou la gestion énergétique. Avec le **suivi énergétique**, seuls des capteurs connectés sont nécessaires. Il s'agit d'informer, en temps réel, sur la consommation d'énergie du logement. Le système peut être accompagné d'un terminal communiquant les données aux habitants, et leur fournissant des conseils personnalisés pour les aider à optimiser leur consommation d'énergie. Avec la **gestion énergétique** au contraire, à la fois des capteurs et des actionneurs sont requis. Ce type de système aide à optimiser les dépenses énergétiques d'un logement en éteignant automatiquement certains appareils à la demande de l'utilisateur. Cette technologie utilise ainsi des prises intelligentes, dont le nombre varie fortement suivant les études.

## 2.4. Quantification des impacts environnementaux

### 2.4.1. Impacts environnementaux du système de gestion de l'énergie

La plupart des articles prennent en compte les impacts des **capteurs connectés du berceau à la tombe**. Ainsi, les processus de production, transport, fabrication, exploitation, et fin de vie font partie de périmètre d'étude. Le devenir de capteurs devenus non fonctionnels étant généralement inconnu, la directive européenne relative aux déchets électroniques (Commission européenne 2012) a parfois été utilisée pour établir un scénario de fin de vie cohérent. La durée de vie des objets connectés est la plupart du temps fixée à cinq ans, mais certains articles (Gangolells et al. 2015) la considère comme un paramètre incertain.

Afin d'associer des données environnementales aux capteurs, la plupart des articles exploitent les données de la base ecoinvent<sup>1</sup>. D'autres bases environnementales sont aussi utilisées en complément (Scheepens et Vogtländer 2018; Kumar et Mani 2017; Walzberg et al. 2017; 2020). Les chercheurs expliquent que les capteurs sont démontés, et que les différents matériaux sont pesés. Ensuite, les fiches ecoinvent ayant les caractéristiques physiques et techniques les plus proches des matériaux analysés sont retenues. La collecte des données environnementales est très rarement détaillée. Il est d'ailleurs possible que les données liées à la modélisation des capteurs soient confidentielles. L'article de Louis et al. (2015) fait figure d'exception, puisqu'il détaille l'intégralité des fiches environnementales sélectionnées pour faire l'ACV du système, ainsi que les quantités de matériaux associées.

#### **2.4.2. Impacts environnementaux des gains énergétiques**

Selon le poste de consommation énergétique étudié, les auteurs évaluent la consommation d'un **bâtiment non connecté de référence**, à l'aide, par exemple, de leur propre expertise, de données de la littérature, de simulations thermiques dynamiques (STD) ou de modélisation basée sur les agents. Les calculs sont conduits sur une année type, puis les résultats sont ensuite ramenés à la durée de vie fonctionnelle du système. La plupart des articles considèrent un mix électrique fixe, dont les données d'inventaire sont données par ecoinvent. L'originalité de l'étude de Louis et Pongrácz (2017) est qu'elle tient compte, pour plus de réalisme dans l'évaluation des impacts, de la variabilité horaire du mix électrique national finlandais. Walzberg et al. (2017; 2020) procèdent de même, en calculant les impacts du système à chaque pas de temps. Beucker et al. (2016) tiennent compte de l'effet des incertitudes à long terme, du fait de la longue durée de vie des bâtiments, en réalisant une ACV prospective sur l'évolution du mix de production d'électricité aux horizons 2030 et 2050.

Les économies permises par la mise en place des objets connectés sont évaluées par jugements d'experts, par analyse de la littérature existante, ou encore via des simulations spécifiques. Les articles insistent sur le fait qu'il est difficile d'estimer les gains énergétiques réels permis par les capteurs. Pour pallier ce problème, différents **scénarios de réduction de la consommation** sont généralement étudiés. Ainsi, van Dam et al. (2013) simulent six scénarios d'économie d'énergie différents. Cinq scénarios font l'hypothèse d'une économie d'énergie fixe comprise entre 2 % et 10 %. Un dernier scénario évolutif, basé sur des travaux préalables (van Dam et al. 2010), simule la baisse d'efficacité du système, au fur et à mesure que l'implication de l'utilisateur diminue.

#### **2.4.3. Indicateurs environnementaux évalués**

La prise en compte de plusieurs indicateurs environnementaux n'est pas systématique. Certaines études sont monocritères : elles se focalisent sur la consommation d'énergie primaire au cours du cycle de vie du système. S'ils mettent principalement l'**accent sur l'énergie et les émissions de gaz à effet**

---

<sup>1</sup> <https://ecoinvent.org/>

**de serre**, les articles postérieurs tendent vers l'intégration d'un nombre croissant d'indicateurs environnementaux, comprenant des impacts orientés problème et dommage (Louis et al. 2015; Beucker et al. 2016; Walzberg et al. 2017).

En outre, certains articles (van Dam et al. 2013; Scheepens et Vogtländer 2018) considèrent un indicateur nommé ecocost. Il correspond à la somme d'argent qu'il faudrait investir pour compenser les dommages humains, environnementaux, ainsi que la raréfaction des ressources induits par la fabrication, l'utilisation et la fin de vie d'un système. Toutefois, le recours à un score environnemental unique est critiqué, car le processus d'agrégation des données est opaque. Il induit une perte de l'information.

## 2.5. Résultats des études

Les principaux résultats des études citées sont résumés dans le Tableau 2. Les articles s'accordent à dire que les impacts causés pendant la période d'utilisation des capteurs sont les plus importants (van Dam et al. 2013; Gangolells et al. 2015; 2016; Louis et al. 2015; Louis et Pongrácz 2017). Cela est particulièrement vrai pour les systèmes qui comprennent des prises connectées, puisque la consommation électrique de ces appareils n'est pas négligeable. La phase prépondérante est ensuite la fabrication des objets connectés. Les études multicritères montrent que les capteurs connectés contribuent majoritairement à la toxicité humaine et marine, à l'eutrophisation des cours d'eau, au réchauffement global et à l'épuisement des ressources minérales.

Concernant le **choix entre une version connectée et non connectée du bâtiment**, les articles ne sont **pas unanimes**. Les résultats dépendent fortement des variables des études. Certaines conditions sont favorables à l'installation d'un système de gestion de l'énergie dans un bâtiment, tandis que d'autres ne le sont pas. Van Dam et al. (2013), Gangolells et al. (2015; 2016) approuvent l'installation de capteurs connectés, en montrant que le délai de récupération énergétique est largement inférieur à la durée de vie fonctionnelle du système. Scheepens et Vogtländer (2018) notent que l'installation d'un système de gestion de l'énergie est à privilégier dans un bâtiment faiblement isolé. Dans ces conditions-ci, le dispositif est favorable sur le plan environnemental. Ce n'est pas forcément le cas quand le bâtiment de base est performant, comme le corrobore l'article de Kumar et Mani (2017). Les auteurs s'intéressent à un immeuble de bureaux dont des détecteurs de présence permettent d'éteindre automatiquement les luminaires quand les bureaux sont inoccupés. Si des ampoules basse consommation sont installées, alors ils montrent que le système n'atteint pas la neutralité énergétique. Van Dam et al. (2013), Scheepens et Vogtländer (2018) et Walzberg et al. (2017; 2020) mettent en garde contre l'effet rebond. Ils insistent sur le fait que les systèmes qui sont performants sur le plan environnemental, mais qui tardent à être rentables sur le plan économique sont à privilégier. Ils permettent en effet de limiter certains biais psychologiques incitant à investir l'argent économisé dans des biens et des services potentiellement polluants.

**Tableau 2: Principaux résultats des articles identifiés traitant de bilan environnementaux de bâtiments connectés**

Article	(van Dam et al. 2013)	(Louis et al. 2015)	(Beucker et al. 2016)	(Kumar et Mani 2017)	(Louis et Pongrácz 2017)	(Walzberg et al. 2017)	(Scheepens et Vogtländer 2018)	(Walzberg et al. 2020)
<b>Variantes étudiées</b>	Scénarios de réduction de la consommation  Implication de l'utilisateur	Scénarios de réduction de la consommation	Mix électriques de neuf régions du monde  Evaluation selon trois horizons temporels	Différents types de luminaires  Différentes provenances pour les capteurs	Scénarios de réduction de la consommation  Nombre d'occupants des logements  Variabilité du mix électrique horaire	Climat  Mix électrique	Scénarios de réduction de la consommation  Niveau d'isolation du bâtiment	Climat  Mix électrique et son coût horaire  Scénarios d'effets rebond
<b>Etapes du cycle de vie les plus contributives</b>	Utilisation (entre 67 et 78% de l'énergie primaire EP consommée)  Fabrication (entre 22 et 33% l'EP)	Utilisation (84% des GES)  Fabrication (15% des GES)	Non calculé	Fabrication et le cas échéant transport par bateau des capteurs	Utilisation (de 97 à 23% selon indic.)  Fabrication (de 96 à 2%)  Fin de vie (de <1 à 47%)	Non calculé	Non calculé	Non calculé
<b>Temps de retour énergétiques</b>	De 0 à 1,5 ans	Non calculé	Non calculé	De 0,5 à 11 ans	Non calculé	Non calculé	De 3 à 12 ans (si le retour énergétique est atteint)	Non calculé
<b>La variante connectée est-elle plus favorable ?</b>	OUI, à condition d'utiliser le système sur une période de temps suffisante	OUI, pour la stratégie « suivi énergétique »  NON, pour la stratégie « gestion énergétique » du fait de la consommation des prises connectées	OUI, en particulier si le mix électrique dépend de ressources fossiles	OUI pour les ampoules fluorescentes et à incandescence  NON pour les LED	OUI, pour la stratégie « suivi énergétique » (SAUF s'il n'y a qu'un habitant)  NON, pour la stratégie « gestion énergétique » du fait des prises connectées, mais impacts réduits dans les foyers nombreux	OUI	OUI, si le système est implanté dans un bâtiment faiblement isolé	OUI, malgré l'effet rebond, (SAUF si la consommation énergétique est répartie en fonction de la tarification horaire de l'énergie)

Enfin, la question des **incertitudes** sur les résultats est soulevée dans certains articles (van Dam et al. 2013; Louis et Pongrácz 2017), mais est **peu traitée** (Beucker et al. 2016). Il subsiste notamment de grosses incertitudes concernant la durée d'utilisation réelle du système. Il y a un risque que les usagers s'impliquent de moins en moins dans la gestion de leur consommation d'énergie (van Dam et al. 2013), ou que de nouvelles technologies apparaissent et rendent les équipements actuels obsolètes.

### 3. Positionnement du problème traité dans BEBAC

L'étude des travaux préalablement menés a permis de mettre en lumière de bonnes pratiques, ainsi que des axes d'approfondissement, pour répondre à la question de la pertinence des bâtiments connectés sur le plan environnemental.

Dans le cadre de BEBAC, nous souhaitons mener l'étude la plus complète possible. Ainsi, des **ACV** sont réalisées. Cela permet, d'une part, contrairement aux études monocritères, de calculer **plusieurs indicateurs environnementaux**, et donc d'éviter d'engendrer des déplacements de pollution d'une thématique environnementale vers une autre. D'autre part, l'approche sur le **cycle de vie** complet, permet de s'assurer qu'une réduction des impacts à une phase du cycle de vie ne soit pas contrebalancée par une augmentation des impacts à une autre phase du cycle de vie. En particulier, sur ce second point, nous souhaitons opérer un **changement d'échelle** par rapport aux autres études en analysant les impacts du bâtiment connecté et pas uniquement les impacts de l'utilisation du système de gestion de l'énergie. Dans cette **nouvelle approche**, les **impacts** de la construction, de l'exploitation, de la rénovation et de la fin de vie à la fois **du bâtiment et de son système de gestion de l'énergie** sont alors inclus au périmètre d'étude. Ce changement d'échelle nous permet d'évaluer plus globalement les impacts des bâtiments connectés et de quantifier la part du système de gestion d'énergie dans les impacts totaux du bâtiment.

Comme cela a été proposé dans certaines études précédentes, et pour plus de précision, les ACV menées dans BEBAC sont **dynamiques**. Le terme dynamique signifie ici que les impacts de la consommation d'énergie sont évalués par simulation thermique dynamique et en utilisant un mix horaire pour l'électricité.

Les ACV sont également **comparatives**. Notre objectif est *a minima* de comparer les variantes connectée et non connectée d'un même bâtiment. Comme observé dans la littérature, différentes combinaisons de capteurs et d'actionneurs, correspondant à différentes stratégies d'optimisation de la consommation sont possibles. Plusieurs **niveaux de variantes connectés** sont donc proposés dans BEBAC et leurs impacts environnementaux sont comparés. En complément, ces comparaisons sont menées pour des versions du même bâtiment ayant des niveaux variables de performance énergétique. Il s'agit ici d'évaluer la plus-value de capteurs connectés dans des **bâtiments plus ou moins isolés**, mais aussi d'analyser si une rénovation énergétique reste plus intéressante sur le plan environnemental, qu'une gestion optimisée de l'existant par des objets connectés.

Enfin, en plus d'être dynamiques et comparatives, les ACV réalisées sont **stochastiques**. Nous souhaitons prendre en compte différentes **sources d'incertitudes et de variabilité** pesant sur la modélisation environnementale, telles que la durée de vie des objets connectés et du bâtiment, ou l'occupation. Ainsi, pour chaque variante d'ACV envisagée, un ensemble de calculs est mené en considérant différentes valeurs pour les facteurs incertains. La prise en compte systématique de ces

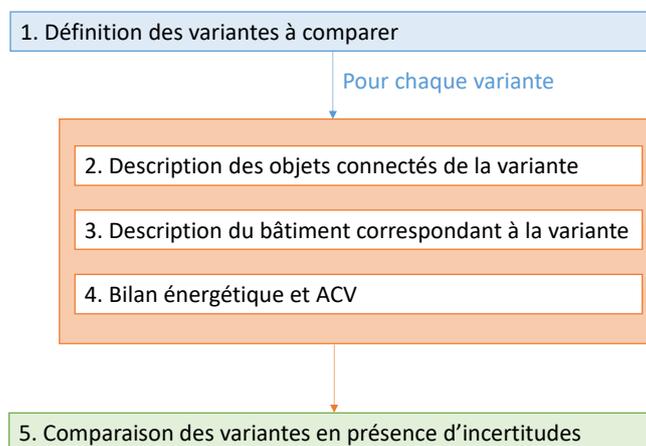
incertitudes dans la comparaison de variantes d'ACV représente la seconde **particularité du projet BEBAC**.

Pour mener à bien ces études, il convient de s'assurer de la disponibilité des données environnementales (en particulier pour les objets connectés). Nous proposons de réaliser une **base de données** flexible permettant de calculer les impacts environnementaux d'**objets connectés** suivant différentes méthodes d'évaluation des impacts, et permettant d'évaluer les incertitudes associées à leur modélisation environnementale.

L'originalité des travaux menés dans le cadre de BEBAC réside donc dans la réalisation d'ACV multicritères dynamiques et stochastiques permettant de comparer différentes versions d'un bâtiment équipé d'objets connectés. Le cadre méthodologique appliqué pour répondre à ces objectifs est développé dans la section suivante.

## 4. Méthodes et outils

Afin de réaliser les ACV multicritères dynamiques et stochastiques pour la comparaison de différentes versions d'un bâtiment équipé d'objets connectés, la méthodologie décrite dans la Figure 1 a été appliquée. Les paragraphes suivants décrivent chaque brique méthodologique.



**Figure 1: Méthodologie appliquée au projet BEBAC.**

### 4.1. Définition des variantes à comparer

Notre objectif est de comparer les performances environnementales d'un bâtiment non connecté et de plusieurs variantes de bâtiment connecté. De plus, nous souhaitons évaluer la pertinence de l'ajout d'objets connectés sur des variantes de bâtiments aux performances énergétiques variables.

Le bâtiment non connecté sert de base pour la comparaison des variantes. Pour limiter la combinatoire, seules deux variantes de bâtiments connectés et deux variantes de performance énergétique sont ensuite définies. Pour la gestion optimisée utilisant des objets connectés, nous retenons les deux options proposées dans la littérature, à savoir le « suivi énergétique » (capteurs connectés et conseils aux usagers), et la « gestion énergétique » (capteurs connectés, conseils aux usagers, et actionneurs pour piloter les systèmes énergétiques). Pour le niveau de performance énergétique, un bâtiment bien isolé est comparé à un bâtiment pas ou peu isolé. Ainsi, les six variantes de bâtiments répertoriées au Tableau 3 sont à comparer.

Pour chaque variante, il convient ensuite de définir les objets connectés à installer et de modéliser le bâtiment sur le plan énergétique et environnemental.

**Tableau 3: Variantes à comparer.**

	Bâtiment peu ou pas isolé	Bâtiment bien isolé
<b>Bâtiment non connecté</b>	Variante 0.a	Variante 0.b
<b>Bâtiment connecté stratégie « suivi énergétique »</b>	Variante 1.a	Variante 1.b
<b>Bâtiment connecté stratégie « gestion énergétique »</b>	Variante 2.a	Variante 2.b

## 4.2. Description des objets connectés

En fonction du cas d'étude, les capteurs et actionneurs connectés nécessaires à la mise en place des stratégies « suivi énergétique » et « gestion énergétique » sont recensés. Il convient de bien décrire ces capteurs pour évaluer leurs impacts environnementaux le plus précisément possible. De plus, l'un des objectifs du projet étant de constituer une base de données flexible permettant de calculer les impacts environnementaux d'objets connectés, des descriptions précises d'un grand nombre de capteurs et d'actionneurs connectés sont nécessaires.

Des fiches environnementales PEP (Profil Environnemental Produit) sont disponibles dans la base environnementale française des données de construction INIES<sup>2</sup> pour des équipements électriques, électroniques et de génie climatique. Les PEP présentent les résultats d'ACV relatifs à une fonction et une durée de vie du produit dans l'ouvrage, conformément à la norme NF EN 15 804 (2014). Cette base de données compile de nombreuses données utiles au projet sur des objets connectés, mais présente l'inconvénient d'être peu flexible. En effet, les valeurs d'impact sont complexes à extraire, elles ne sont disponibles que pour les indicateurs de la norme 15 804, et elles ne contiennent pas d'informations sur les incertitudes liées à la modélisation environnementale des objets connectés.

Pour obtenir une base de données de capteurs connectés plus flexible, il a été choisi dans le cadre de BEBAC d'utiliser le logiciel d'ACV *open source* codé en Python Brightway2 (Mutel 2012; 2017) et les données d'inventaire de produits et de procédés de la base ecoinvent v3.4 (Weidema et al. 2013). La base de données flexible est complétée en procédant comme suit :

1. Les compositions de matériaux et les procédés nécessaires pour chaque capteur sont décrits dans l'outil Brightway2 ;
2. À chaque matériau et procédé sont associées les données environnementales correspondantes de la base ecoinvent ;
3. Les matériaux et procédés pour lesquels les quantitatifs sont incertains sont définis comme des paramètres grâce aux fonctions de la librairie *lca-algebraic* (Jolivet et al. 2021) de Brightway2 et des distributions de probabilité leur sont associées ;
4. Les indicateurs environnementaux à calculer pour l'étude sont choisis dans Brightway2 ;

<sup>2</sup> <https://www.inies.fr/>

5. Les impacts environnementaux de chaque objet connecté sont calculés dans Brightway2 soit pour la valeur par défaut des facteurs incertains, soit pour un ensemble de valeurs tirées dans les lois de distribution des paramètres incertains.

Dans ce projet, les compositions de matériaux et les procédés nécessaires pour chaque capteur à saisir à l'étape 1 sont obtenus de deux manières :

- Dans le cas où nous disposons des objets connectés, ceux-ci sont démontés, séparés en leurs sous-composants, puis pesés et mesurés ;
- Pour d'autres objets connectés, les fiches PEP sont lues et analysées pour en extraire la liste des composants, puis les composants sont saisis dans Brightway2. Pour ce type de capteurs et actionneurs, les impacts de la norme 15 804 sont recalculés avec Brightway2 et comparés avec les impacts affichés dans les fiches PEP. En cas d'écarts trop importants (supérieurs à 20 %), la saisie dans Brightway2 est ajustée pour se rapprocher des valeurs données dans les fiches PEP.

La base de données environnementale d'objets connectés ainsi obtenue est flexible au sens où les quantitatifs des produits et procédés sont facilement modifiables ; différents indicateurs environnementaux peuvent être recalculés ; de plus, des analyses de sensibilité et d'incertitudes peuvent être menées pour les objets connectés modélisés.

---

*Pour réaliser cette partie du projet BEBAC, il a été nécessaire d'acheter une licence pour accéder à la base de données environnementales ecoinvent.*

---

### **4.3. Description du bâtiment**

À cette étape, des données sont collectées sur toutes les variantes du bâtiment traité dans le cas d'étude. Il s'agit de répertorier les données qui seront utiles pour réaliser son bilan énergétique (géométrie, propriétés thermiques des composants d'enveloppe, scénarios d'utilisation, systèmes énergétiques, ...) et son bilan environnemental (quantitatif de matériaux, procédés utilisés à toutes les étapes du cycle de vie, ...). Pour les variantes connectées du bâtiment, des hypothèses de réduction de la consommation permise par les objets connectés sont prises ; elles concernent des diminutions des consommations de chauffage ou d'électricité spécifique).

Les incertitudes et variabilités pesant sur la modélisation environnementale sont identifiées et des distributions leurs sont associées. Cela peut être fait en se basant sur des travaux issus de la littérature (Hoxha et al. 2017; Pannier 2017; Marsh et al. 2022). Notons que dans le cadre de BEBAC, nous ne choisissons d'affecter des incertitudes qu'aux seules données de premier plan. Ainsi seuls les produits et procédés du bâtiment et de ses objets connectés peuvent varier. Les incertitudes sur les données d'arrière-plan (par exemple : incertitude sur la quantité d'électricité consommée par l'usine qui a fabriqué la soupape de sécurité de la chaudière) ne sont pas traitées dans cette étude, cela

nécessiterait des traitements complexes sur l'étude des corrélations entre les systèmes d'arrière-plan qui font encore l'objet de recherche en ACV.

#### 4.4. Bilan énergétique et ACV des variantes

Toutes les hypothèses sur les variantes de bâtiments étant connues, leurs bilans énergétiques et environnementaux peuvent être calculés.

Une STD est tout d'abord menée avec le modèle COMFIE (Peuportier et Blanc-Sommereux 1990) du logiciel Pleiades<sup>3</sup>, pour chacune des deux variantes d'enveloppe (bâtiment non isolé 0.a et isolé 0.b). Cette étape est importante pour une évaluation précise de l'évolution temporelle des besoins énergétiques, qui représentent généralement une grande partie des impacts environnementaux des bâtiments. La variabilité de l'occupation d'un bâtiment est prise en compte en utilisant le modèle occupant (Vorger 2014; Schalbart et al. 2021) du modèle Amapola de Pleiades.

Les ACV des deux variantes 0.a et 0.b sont ensuite menées avec le modèle EQUER (Polster 1995; Popovici 2005; Peuportier et al. 2013) du module ACV de Pleiades. Les données environnementales pour les produits et procédés intervenant pour ces deux bâtiments sont obtenues à partir de la base de données ecoinvent v3.4. Dans Pleiades ACV, le mix électrique est défini à un pas de temps horaire (Herfray 2011), ce qui permet de faire un calcul d'ACV dynamique pour l'évaluation des impacts de l'usage d'électricité. À ce stade, les impacts de la construction, de l'utilisation, de la rénovation et de la fin de vie des deux variantes non connectées sont obtenus.

Finalement, l'outil Brightway2 est utilisé pour calculer les impacts des variantes connectées du bâtiment (1.a, 1.b, 2.a, 2.b). Pour ce faire, aux variantes 0.a et 0.b sont ajoutés les impacts des objets connectés. De plus, les impacts de l'utilisation de l'énergie sont réduits, conformément aux hypothèses de diminution de la consommation permise par les objets connectés.

Brightway2 est aussi utilisé pour propager les incertitudes et variabilités dans les modèles des bâtiments et des objets connectés. Ainsi, une distribution des impacts pour chaque indicateur environnemental est obtenue et pour chacune des six variantes de bâtiment.

Notons que dans ce projet, nous nous basons uniquement sur des données simulées pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments connectés. Une perspective serait d'utiliser des données mesurées dans différents bâtiments pour évaluer les consommations énergétiques et les gains permis par le système connecté.

---

*Pour réaliser cette partie du projet BEBAC, il a été nécessaire d'acheter des licences pour les modules STD, Amapola et ACV du logiciel Pleiades diffusé par Izuba énergies.*

---

---

<sup>3</sup> <https://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/>

#### 4.5. Comparaison de variantes d'ACV en présence d'incertitudes

Pour comparer des variantes en ACV, des propagations d'incertitude sont généralement réalisées séparément sur chaque variante et les résultats sont présentés sous la forme d'histogramme avec des barres d'incertitude (graphiques a. et b. de la Figure 2), ou sous la forme d'un ensemble de distributions d'incertitude affichées dans un même graphique. Cependant, cette représentation ne permet pas d'apporter de réponse satisfaisante à l'impact des incertitudes sur les résultats, puisqu'elle ne tient pas compte la dépendance entre les deux variantes comparées, notées A et B à la Figure 2. Henriksson et al. (2015) préconisent alors d'utiliser le même plan d'expérience pour les sources d'incertitudes et de variabilité communes aux variantes à comparer. De cette manière, les variantes sont étudiées toutes choses égales par ailleurs et deviennent comparables.

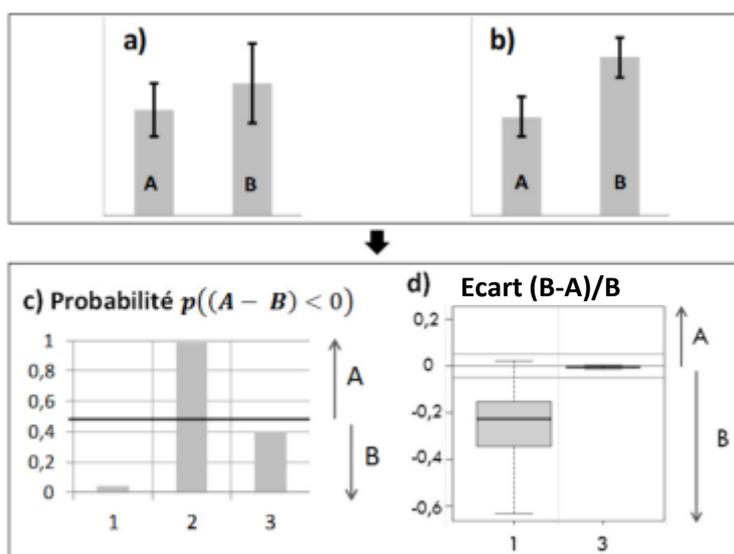


Figure 2: Analyse d'incertitude en comparaison de variantes. Issue de (Pannier et al. 2019).

Dans le cadre de BEBAC, le même plan d'expérience a été appliqué à toutes les variantes à comparer. Afin d'extraire plus d'informations de la comparaison des variantes en présence d'incertitudes, les différences relatives entre les alternatives sont calculées (graphique d. de la Figure 2), comme proposé par Pannier (2017). Pour chaque ligne du plan d'expérience, les écarts d'impacts entre une variante et la variante de référence sont calculés. Cette valeur est divisée par les impacts de la variante de référence. L'exemple de calcul de l'équation (1) permet d'évaluer les écarts relatifs (RD pour *relative difference*) des variantes non isolées non connectée (0.a) et connectée avec la stratégie « suivi énergétique » (0.b).

$$RD_{i,j} = \frac{\text{Impact Variante 0. } a_{i,j} - \text{Impact Variante 0. } b_{i,j}}{\text{Impact Variante 0. } a_{i,j}} \quad (1)$$

avec  $i$  l'indicateur environnement considéré et  $j$  la ligne du plan d'expérience.

## 5. Cas d'étude

La méthodologie décrite à la section précédente a été appliquée à deux cas d'étude.

### 5.1. Cas d'étude 1

Ce premier cas d'étude, réalisé en 2021, a été présenté lors de la conférence LCM 2021 à Stuttgart, le 8 septembre 2021. Les résultats ont été valorisés dans un article dans les actes de la conférence (Pannier et al. 2022).

Le bâtiment modélisé dans le premier cas d'étude est un bâtiment fictif représentant un petit immeuble collectif situé à Angers. Il se compose de six logements répartis sur trois étages et sa surface habitable totale est de 380 m<sup>2</sup>. L'énergie utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) est l'électricité.



Figure 3 : Immeuble collectif du cas d'étude 1.

#### 5.1.1. Caractérisation des variantes

Deux niveaux de performance énergétique sont envisagés. Le premier se réfère à un bâtiment construit en France dans les années 90, l'orientation n'est pas optimale, et le bâtiment est mal isolé ( $R_{mur}=1,52 \text{ m}^2.K/W$ ). Le second est proche d'une conception passive. La maison est bien isolée ( $R_{mur}=5,18 \text{ m}^2.K/W$ ), bien orientée, et dispose d'une pompe à chaleur.

Trois alternatives intelligentes sont comparées (voir Tableau 4). La première sert de référence. Il s'agit d'un bâtiment conventionnel sans capteurs ni actionneurs, pour lequel aucune économie d'énergie n'est possible. Dans la deuxième variante « suivi énergétique » (*building monitoring*), le bâtiment est instrumenté et dispose de capteurs d'ambiance dans les pièces à vivre (capteurs de température et de CO<sub>2</sub>) et de compteurs d'énergie. Une interface utilisateur informe les occupants des consommations du bâtiment et leur donne des conseils personnalisés pour réduire leur consommation. Nous supposons que les économies de chauffage et d'électricité permises avec la stratégie « suivi énergétique » sont en moyenne de 4 %. La troisième option représente une stratégie de type « gestion énergétique » (*building management*). Sur la base des données collectées par les capteurs intelligents, les actionneurs intelligents (robinets thermostatiques et prises électriques

connectées) agissent sur les systèmes du bâtiment sans nécessiter d'action des occupants. Les usagers ont toutefois la possibilité de modifier s'ils le souhaitent le réglage défini. Nous supposons que les économies de chauffage et d'électricité permises avec la stratégie « gestion énergétique » sont en moyenne de 20 %. Les estimations sur les économies d'énergie sont basées sur des données de la littérature (van Dam et al. 2010; van Dam et al. 2013; Beucker et al. 2016; Reynolds et al. 2018; Walzberg et al. 2020).

**Tableau 4 : Variantes de gestion énergétique du bâtiment du cas d'étude 1. Issu de (Pannier et al. 2022).**

Alternative		Gains énergétiques	Objets connectés
	Non connecté	Pas de gains	Pas d'objets connectés
	Suivi énergétique	Gains : échantillonnage aléatoire dans $N(\mu = 4 \% ; \sigma = 1,5 \%)$	Capteurs d'ambiance dans les pièces principales, compteurs d'énergie Interface utilisateur
	Gestion énergétique	Gains : échantillonnage aléatoire dans $N(\mu = 20 \% ; \sigma = 5 \%)$	Capteurs d'ambiance, thermostat, compteurs d'énergie, actionneurs (robinets thermostatiques et prises connectées) Unité de commande et interface utilisateur

Les données d'inventaire pour les capteurs proviennent de fiches PEP de différents fabricants (retravaillées dans Brightway2 comme expliqué au § 4.2) ou de données génériques de la base de données ecoinvent.

### 5.1.2. Cadre pour la comparaison de variantes

L'unité fonctionnelle correspond à un petit immeuble collectif de six logements étudié sur 80 ans. La construction, l'utilisation, les rénovations et la fin de vie à la fois du bâtiment et de son système de gestion énergétique connecté sont incluses dans le périmètre d'étude. Concernant la phase d'exploitation, les impacts associés aux usages d'énergie (chauffage, ventilation, éclairage, électricité spécifique) et à l'utilisation d'eau sont comptabilisés. Les impacts liés aux déplacements domicile-travail et aux déchets ménagers produits par les occupants sont toutefois exclus du périmètre d'étude. Les impacts de l'envoi et du stockage sur des serveurs des données collectées par les objets connectés ne sont pas ailleurs pas comptabilisés dans ce premier cas d'étude.

Quatre indicateurs environnementaux sont évalués : i) le changement climatique (CC), selon l'indicateur GWP 100 défini par le GIEC (IPCC Working Group I 2013) ; la demande cumulative d'énergie (CED) (Frischknecht et al. 2015) ; et iii) et iv) les dommages à court terme sur la qualité des écosystèmes et sur la santé humaine calculés selon la méthodologie d'ImpactWorld+ (Bulle et al. 2019).

### 5.1.3. Incertitudes prises en compte

Les incertitudes et variabilités prises en compte dans le premier cas d'étude concernent :

- Les gains permis par les stratégies « suivi énergétique » et « gestion énergétique » ;
- L'occupation.

Dans la variante « suivi énergétique », les occupants peuvent décider de suivre ou d'ignorer les conseils personnalisés qui leur sont communiqués pour réduire leur consommation. Les économies d'énergie réalisées sont donc variables. Nous supposons alors que les économies de chauffage et d'électricité sont normalement distribuées, avec une valeur moyenne de 4 % et un écart type de 1,5 % comme mentionné dans le Tableau 4.

Dans la variante « gestion énergétique », comme les occupants peuvent toujours modifier manuellement la régulation fixée par les actionneurs, les économies d'énergie restent variables. Nous supposons que les économies de chauffage et d'électricité sont normalement distribuées avec 20 % d'économies comme valeur moyenne et 5 % comme écart type (voir le Tableau 4).

Enfin, différents types de famille avec des niveaux d'équipement différents peuvent vivre dans un même logement. Ainsi, au lieu de considérer un scénario d'occupation déterministe (pour la consigne de chauffage, la présence d'occupants, ou les apports internes), de nombreuses simulations avec différents scénarios réalistes sont faites, afin de prendre en compte la variabilité de l'occupation.

### 5.1.4. Orchestration des simulations

Les simulations effectuées pour aboutir aux ACV de toutes les variantes sont effectuées comme présenté à la Figure 4.

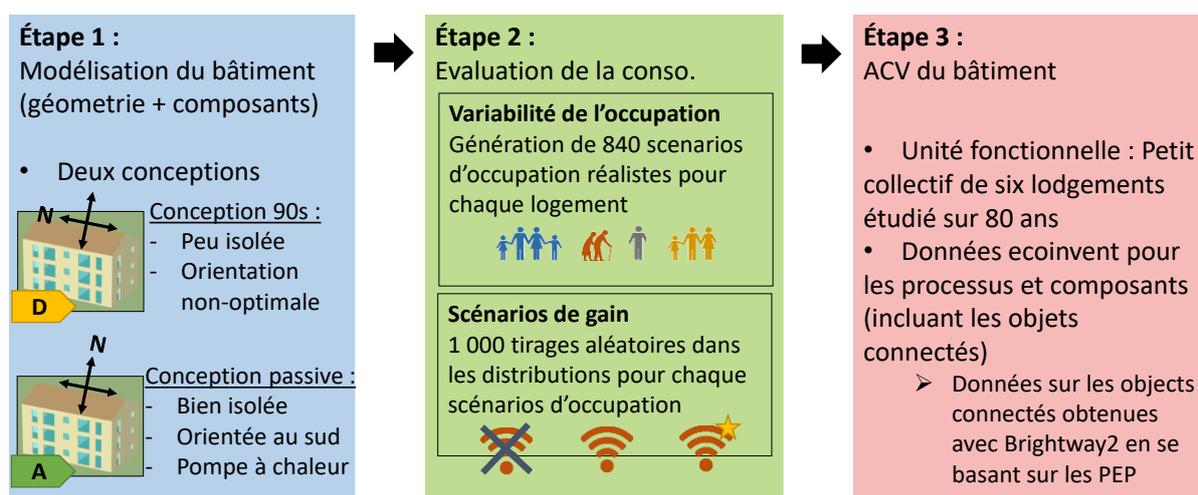


Figure 4: Méthodologie globale pour le cas d'étude 1. Issue de (Pannier et al. 2022).

Tout d'abord, les deux alternatives de conception (faiblement isolé : *90s design* et passive : *passive design*) sont modélisées dans Pleiades STD. Ensuite, la consommation d'énergie est évaluée pour les deux conceptions. Afin de prendre en compte la diversité des familles qui peuvent vivre dans

les six logements ainsi que les différents équipements domestiques qu'une famille possède, le générateur de scénarios d'occupation réalistes du module Amapola du logiciel Pleiades est utilisé. 840 scénarios d'occupation sont obtenus pour chaque logement. Ensuite, pour chaque famille générée, une valeur est sélectionnée aléatoirement dans la distribution des économies pour les stratégies "suivi énergétique" et "gestion énergétique". Troisièmement,  $(840 \times 1\ 000 =)$  840 000 ACV de chaque variante sont réalisées (dans Pleiades ACV et Brightway2) en supposant une durée de vie du bâtiment de 80 ans et un remplacement des dispositifs intelligents tous les 10 ans.

## 5.2. Cas d'étude 2

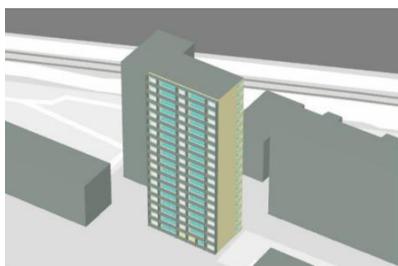
---

*Ce second cas d'étude a été réalisé en 2022 par Clémence Lagarde dans le cadre de son stage de fin d'études financé par BEBAC. Cette partie a été rédigée sur la base de son rapport de stage (Lagarde 2022). Un article pour un journal est en cours de rédaction pour présenter ces travaux.*

---

Le second cas d'étude s'inscrit dans la continuité du premier. Il se veut plus réaliste : le bâtiment étudié correspond à un bâtiment existant réellement qui dispose de capteurs connectés. L'impact de l'envoi et du stockage sur des serveurs des données collectées par les objets connectés, est pris en compte. De plus, des sources d'incertitudes supplémentaires sont incluses ; elles portent principalement sur les objets connectés.

Le bâtiment étudié est une tour de logements de 17 étages, composée principalement de T4 et ayant une surface habitable de 2 700 m<sup>2</sup>. La tour est située dans le sud-est de la France. Elle date de 1976 et possède un niveau d'isolation relativement faible (seul le plancher haut est isolé). L'énergie utilisée pour le chauffage et l'ECS est le gaz. Toutes les **données** concernant ce cas d'étude nous ont été **fournies par la société Kocliko**<sup>4</sup>, qui développe des solutions pour individualiser les frais de chauffage dans les bâtiments résidentiels collectifs.



**Figure 5 : Tour de logements du cas d'étude 2.**

### 5.2.1. Caractérisation des variantes

Quatre variantes sont modélisées dans ce cas d'étude. Elles correspondent aux variantes 0.a, 1.a, 2.a, et 0.b du Tableau 3. Nous retrouvons donc :

---

<sup>4</sup> <https://www.kocliko.co/>

- Une variante de base non connectée;
- Une variante connectée, dite « offre Kocliko niveau 1 », permettant des économies d'énergie à l'échelle des usagers;
- Une seconde variante connectée, dite « offre Kocliko niveau 2 », permettant des économies d'énergie à l'échelle des usagers et à l'échelle de l'installation de chauffage, grâce à une régulation optimisée. En contrepartie, cette variante nécessite la mise en place d'un plus grand nombre d'objets connectés;
- Une variante non connectée mais rénovée qui respecte les exigences de la réglementation thermique française pour l'existant RT<sub>ex</sub>, dite « offre Kocliko niveau 3 ».

Les caractéristiques des variantes sont résumées dans le Tableau 5.

**Tableau 5 : Variantes de gestion énergétique du bâtiment du cas d'étude 2.**

 	Base	Pas de gains énergétiques	Pas de capteurs
 	Niveau 1: Suivi et information aux locataires	Gains : $N(\mu = 10 \% ; \sigma = 2,5 \%)$ 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sonde extérieure ; 2 sondes intérieures par logement, coffret IoT</li> <li>• Interface utilisateur</li> </ul>
 	Niveau 2 : Niveau 1 + Pilotage	Gains : Niveau 1 + $N(\mu = 20 \% ; \sigma = 4 \%)$ 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau 1 + 2<sup>nd</sup> coffret IoT</li> </ul>
 	Rénovation	Gains : calculés par STD	Pas de capteurs

Concernant les deux variantes connectées, elles sont définies comme suit :

- L'« offre Kocliko niveau 1 » permet de générer des économies de chauffage à l'échelle des usagers, estimées à 10 %. Elle implique l'usage d'une sonde de température extérieure, de deux sondes de température intérieure par logement, et d'un coffret IoT (box domotique centralisant les données collectées par les capteurs et les transmettant en 4G à un serveur externe) en chaufferie.
- L'« offre Kocliko niveau 2 » permet des économies d'énergie à l'échelle des usagers, estimées à 10 %, et à l'échelle du bâtiment, estimées à 20 %, grâce à une régulation optimisée du système de chauffage tenant compte des caractéristiques du bâtiment et des conditions météorologiques. Cette option intègre l'ensemble des objets connectés de l'offre de niveau 1, auquel il faut ajouter un second coffret IoT en chaufferie pour la transmission des données nécessaires à la régulation du système.

Les objets connectés utilisés par Kocliko ne sont pas présents dans la base de données INIES. Nous nous sommes inspirés des articles de l'état de l'art, et en particulier de l'article de Louis et al. (2015), pour modéliser les capteurs. Ceux-ci ont été démontés afin de peser et mesurer leurs sous-composants. L'ensemble des hypothèses de modélisation des capteurs est disponible dans le rapport de stage de Clémence Lagarde (2022) mis à disposition sur demande.

### 5.2.2. Cadre pour la comparaison de variantes

L'unité fonctionnelle peut être caractérisée de la manière suivante : un bâtiment résidentiel habité par X personnes pendant Y années ; X et Y étant des facteurs incertains.

Pour permettre l'utilisation du bâtiment par ses habitants pendant sa durée de vie fonctionnelle, nous considérons l'ensemble des matériaux constructifs et des équipements énergétiques nécessaires pour la construction et la maintenance du bâtiment. Cela inclut les matériaux structurels, les matériaux d'isolation et d'étanchéité, les revêtements, les menuiseries, et les équipements de production de chaleur et d'ECS. Le périmètre de l'étude englobe également toutes les consommations énergétiques qui ont lieu au cours de la période d'exploitation du bâtiment (production de chaleur, consommation d'électricité spécifique, consommation des auxiliaires de ventilation, production d'ECS, alimentation en eau courante). Les variantes connectées tiennent compte du cycle de vie des objets connectés installés, et de la consommation énergétique liée au stockage des données sur un serveur externe. Les impacts générés par les produits de construction et les équipements énergétiques sont calculés du berceau à la tombe. Il en est de même pour les impacts générés par les objets connectés. Enfin, nous tenons compte des impacts évités grâce au réemploi et/ou au recyclage des produits en fin de vie. Nous considérons que 50 % des impacts environnementaux évités sont alloués au bâtiment étudié (n). Les 50 % restants sont alloués au bâtiment construit à partir des produits recyclés (n+1). Cette méthode d'allocation des impacts évités, appliquée dans Pleiades ACV, permet de valoriser le bâtiment d'où proviennent les matériaux recyclés. Le périmètre d'étude est schématisé à la Figure 6.

	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	Impacts évités
Produits de construction et équipements techniques	Extraction des matières premières, transport, fabrication	Transport, construction et installation sur site	Maintenance et remplacement	Déconstruction, transport, traitement des déchets, élimination	Impacts environnementaux évités (recyclage des matériaux)
Production de chaleur	Extraction des ressources, transport, production d'énergie	Transport de l'énergie jusqu'au site	Consommation énergétique du poste chauffage		
Électricité spécifique	Extraction des ressources, transport, production d'électricité	Transport de l'électricité jusqu'au site	Consommation d'électricité spécifique		
Auxiliaires de ventilation	Extraction des ressources, transport, production d'électricité	Transport de l'électricité jusqu'au site	Consommation électrique des auxiliaires de ventilation		
Production d'ECS	Extraction des ressources, transport, production d'énergie	Transport de l'énergie jusqu'au site	Consommation énergétique liée à la production d'ECS		
Alimentation en eau courante	Prélèvement, traitement de l'eau	Transport jusqu'au site	Consommation d'eau courante		
Système connecté	Extraction des matières premières, transport, fabrication	Transport, installation sur site	Maintenance et remplacement	Déconstruction, transport, traitement des déchets, élimination	Impacts environnementaux évités (recyclage des matériaux)
Stockage des données	Extraction des ressources, transport, production d'électricité	Transport de l'électricité jusqu'au site	Consommation d'électricité permettant de stocker les données sur un serveur externe		

Figure 6 : Frontières du système pour le cas d'étude 2. Issu de (Lagarde 2022).

Les indicateurs environnementaux évalués sont ceux de la norme NF EN 15 804 (NF EN 15804 2014).

### 5.2.3. Incertitudes prises en compte

Des sources d'incertitudes et de variabilités supplémentaires sont prises en compte dans ce second cas d'étude.

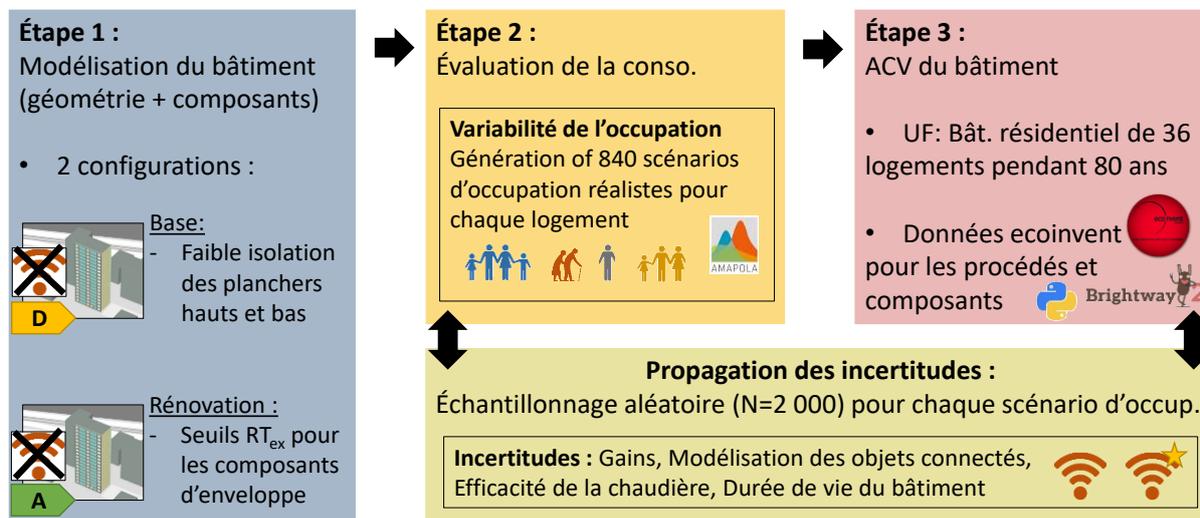
Outre la variabilité liée à l'occupation, les incertitudes référencées au Tableau 6 sont considérées. Nous faisons l'hypothèse de distributions normales pour tous les facteurs incertains. Les paramètres des distributions ont été définis sur la base de données issues de la littérature et de discussions avec les acteurs du projet BEBAC.

**Tableau 6 : Facteurs incertains du cas d'étude 2. Issu de (Lagarde 2022).**

	Paramètre	Défaut	Minimum	Maximum	Écart type	Unité
<b>Bâtiment</b>	Durée de vie du bâtiment <sup>32</sup>	80	50	200	20	années
	Efficacité de la chaudière	90	80	95	2,5	%
	Gains de chauffage individuels	10	5	25	2,5	%
	Gains de la régulation optimisée	20	10	30	4	%
<b>Sonde extérieure</b>	Masse d'ABS	0,15	0,135	0,165	0,0075	kg
	Masse d'aluminium	0,00216	0,0018	0,00252	0,00018	kg
	Surface de circuit imprimé	0,0042	0,0032	0,0052	0,0005	m <sup>2</sup>
	Masse de l'émetteur radio	0,001	0,0009	0,0011	0,00005	kg
	Masse d'une diode	0,001	0,00095	0,00105	0,000025	kg
	Longueur du câble	0,05	0,045	0,055	0,0025	m
	Masse de l'emballage	0,096	0,086	0,106	0,005	kg
	Distance de l'usine au site	185	166,5	203,5	9,25	km
	Masse d'une pile	0,117	0,1158	0,1181	0,000585	kg
	Durée de vie d'une pile	10	6	14	2	années
	Durée de vie du boîtier	15	10	20	2,5	années
<b>Sonde intérieure</b>	Masse d'ABS	0,036	0,031	0,041	0,0025	kg
	Masse d'aluminium	0,0054	0,00459	0,00621	0,000405	kg
	Surface de circuit imprimé	0,0036	0,003	0,0042	0,0003	m <sup>2</sup>
	Masse de l'émetteur radio	0,001	0,0009	0,0011	0,00005	kg
	Masse de l'emballage	0,017	0,015	0,019	0,001	kg
	Distance de l'usine au site	2620	2358	2882	131	km
	Masse d'une pile	0,025	0,02475	0,02525	0,000125	kg
	Durée de vie des piles	10	8	12	1	années
Durée de vie du boîtier	15	10	20	2,5	années	
<b>Box domotique</b>	Masse d'ABS	0,2705	0,2	0,33	0,03525	kg
	Surface de circuit imprimé	0,015	0,01	0,02	0,0025	m <sup>2</sup>
	Masse de l'émetteur radio	0,001	0,0009	0,0011	0,00005	kg
	Masse d'une diode	0,001	0,00095	0,00105	0,000025	kg
	Masse de l'emballage	0,15	0,135	0,165	0,0075	kg
	Distance de l'usine au site	540	486	594	27	km
	Consommation d'électricité	43,8	39,42	48,18	2,19	kWh/an
Durée de vie de la box domotique	10	8	12	1	années	
<b>Fin de vie</b>	Distance du site à la décharge	1000	800	1200	100	km
	Potentiel de recyclage	0,5	0,1	0,9	0,25	%

### 5.2.4. Orchestration des simulations

Les simulations effectuées pour aboutir aux ACV de toutes les variantes sont effectuées comme présenté à la Figure 7.



**Figure 7: Méthodologie globale pour le cas d'étude 2.**

Dans un premier temps, le bâtiment est modélisé dans sa variante de base et dans sa variante rénovée avec Pleiades. Dans un second temps, la consommation énergétique est calculée en faisant les STD des deux variantes. Afin de prendre en compte la diversité des familles pouvant habiter les 36 logements, ainsi que la diversité de leurs comportements et des équipements électro-ménagers qu'elles possèdent, le générateur de scénario d'occupation réaliste du module Amapola de Pleiades est utilisé, comme dans le cas d'étude précédant. Dans la troisième étape, les ACV sont réalisées. À chacune des  $2 \times 840$  simulations, sont en fait associées 2 000 ACV pour prendre en compte les incertitudes liées aux gains énergétiques, à la modélisation des objets connectés, à l'efficacité de la chaudière, et à la durée de vie du bâtiment. Les valeurs de ces facteurs sont échantillonnées dans des distributions normales définies au Tableau 6.

---

## 6. Résultats

Les contributions du projet se déclinent en une base de données sur les objets connectés, ainsi qu'en l'analyse des résultats de deux cas d'études comparant les performances environnementales de bâtiments connectés et non connectés.

### 6.1. Base de données sur les capteurs connectés

---

*La base de données flexible sur les objets connectés a été constituée lors du stage de Thomas Remoué en 2021. Elle a été complétée et enrichie en 2022, dans le cadre du stage de Clémence Lagarde, afin de permettre la réalisation d'analyses de sensibilité et d'incertitude sur les objets connectés.*

---

L'un des livrables du projet concerne le développement d'une base de données flexible sur les objets connectés. Cette base de données a été développée comme expliqué au § 4.2. Les quantitatifs des matériaux et procédés utiles aux différentes étapes du cycle de vie des capteurs sont facilement modifiables ; les impacts environnementaux peuvent être recalculés selon différentes méthodes ; et des analyses de sensibilité et d'incertitudes peuvent être menées.

#### 6.1.1. Constitution de la base de données

La base de données contient une cinquantaine de références d'objets connectés allant de la sonde de température, au détecteur de mouvement en passant par des compteurs connectés. La plupart de ces références sont issues des fiches PEP de la base INIES. Dans le cadre du cas d'étude 2, quatre références ont été démontées, pesées et mesurées, avant d'être ajoutées à la base de données.

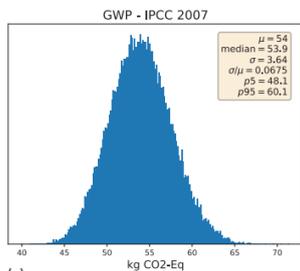
#### 6.1.2. Exemple d'analyse de sensibilité et d'incertitude sur les objets connectés

Toutes les entrées des objets connectés peuvent être définies comme des paramètres grâce aux fonctions de *lca-algebraic* de Brightway2. Il est aussi possible de leur affecter des distributions de probabilité. L'outil échantillonne ensuite dans les distributions et recalcule l'ACV pour chaque jeu de valeur des facteurs incertains. Cette propagation des incertitudes dans le modèle d'ACV, ou analyse d'incertitude, permet d'obtenir des distributions de valeur d'impacts pour tous les indicateurs environnementaux. Un exemple est donné à la Figure 8 pour l'indicateur de changement climatique et pour la box domotique du cas d'étude 2 (les distributions des facteurs incertains ont été préalablement définies au Tableau 6).

Des analyses de sensibilité peuvent aussi être menées. L'objectif est d'identifier les facteurs incertains les plus influents du modèle. La procédure utilisée dans *lca-algebraic* pour ce faire est de type *One-factor-At-a-Time*. Pour un paramètre donné, le logiciel sélectionne dix valeurs équitablement réparties entre les bornes inférieures et supérieures du domaine de variation. Il calcule les impacts

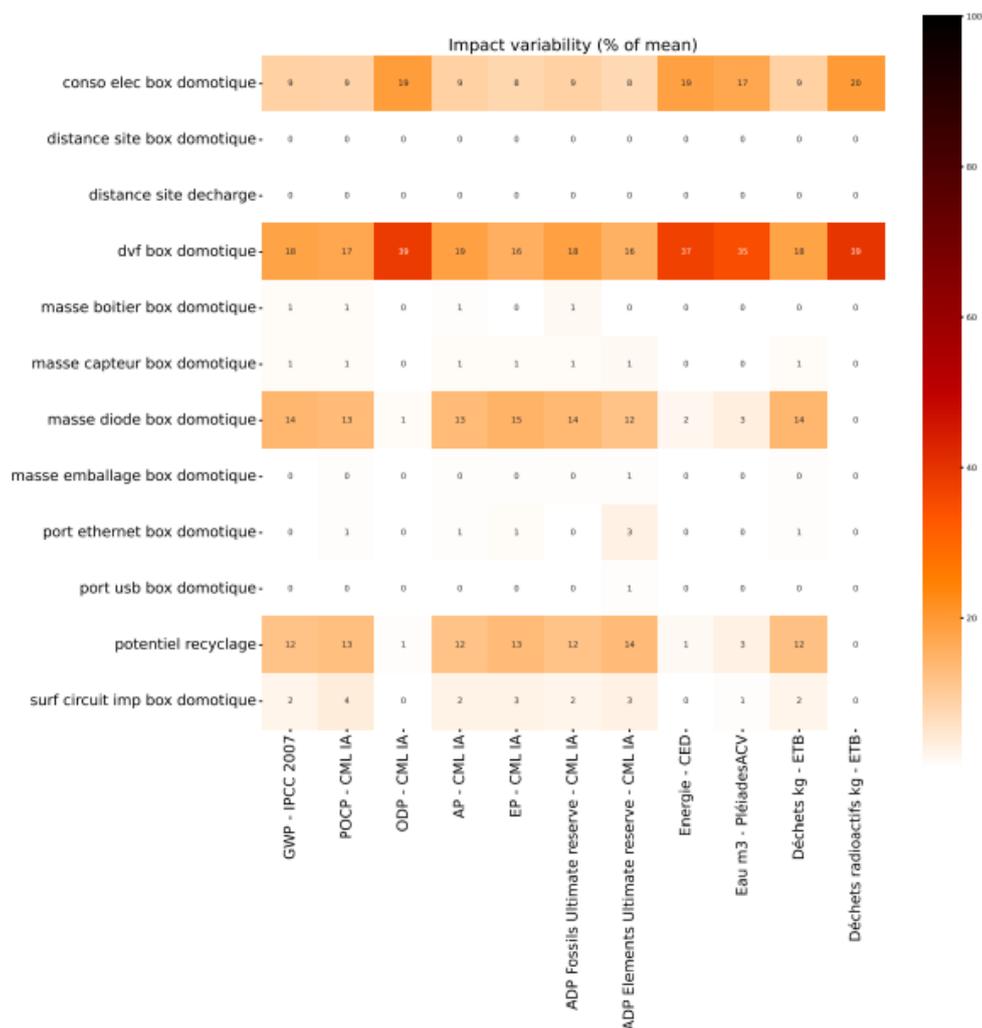
associés, en attribuant aux autres paramètres leurs valeurs par défaut. Pour chaque impact évalué et pour chaque paramètre du modèle, le taux de variation est donné par la formule (2) :

$$variation = \frac{Impact_{max} - Impact_{min}}{Impact_{median}} \tag{2}$$



**Figure 8 : Distribution des valeurs d'impact pour le changement climatique pour la box domotique du cas d'étude 2. Issue de (Lagarde 2022).**

Les résultats de l'analyse de sensibilité de la box domotique sont donnés à la Figure 9. La durée de vie et la consommation électrique sont les facteurs les plus influents du modèle de la box.



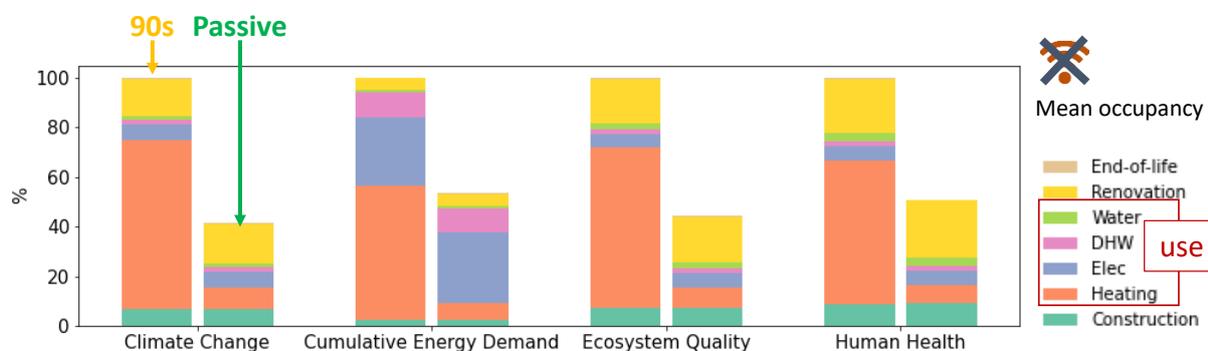
**Figure 9 : Analyse de sensibilité pour la box domotique du cas d'étude 2. Issue de (Lagarde 2022).**

## 6.2. Résultats du cas d'étude 1

Les ACV de variantes de bâtiments du cas d'étude 1 ont été réalisées par Marie-Lise Pannier en 2021 et présentées à la conférence LCM2021. Cette partie a été rédigée sur la base de l'un des livrables du projet : l'article de conférence publié dans les actes de LCM2021 (Pannier et al. 2022).

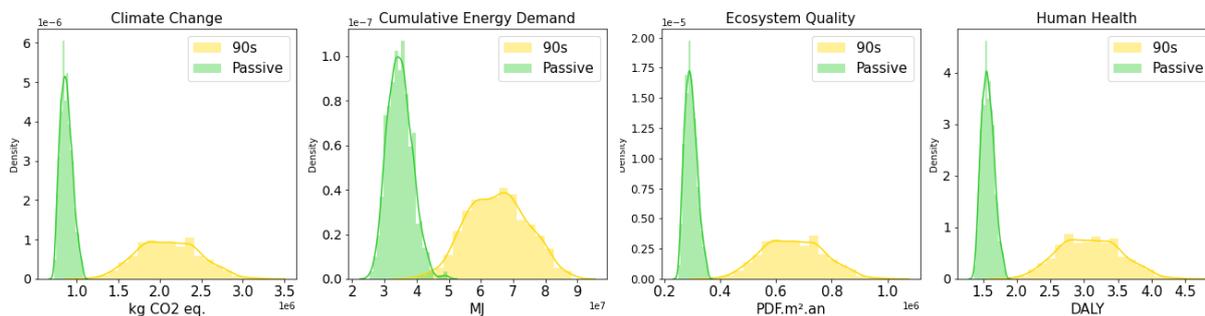
### 6.2.1. Résultats des variantes non connectées

Des résultats habituels sont obtenus pour l'ACV des variantes du bâtiment non connecté (0.a et 0.b) pour les scénarios moyens d'occupation (Figure 10). L'utilisation est l'étape du cycle de vie la plus importante pour la conception des années 90, et les impacts sont considérablement réduits pour la conception passive.



**Figure 10 : Analyse de contribution pour les alternatives non connectée et l'occupation moyenne pour le cas d'étude 1. Issu de (Pannier et al. 2022).**

L'effet de la variabilité de l'occupation sur les variantes non connectées est illustré à la Figure 11. Le recouvrement des distributions pour les deux variantes d'enveloppe du bâtiment est très faible pour chaque indicateur, ce qui signifie que la conception passive reste la meilleure option, quel que soit le comportement des occupants.

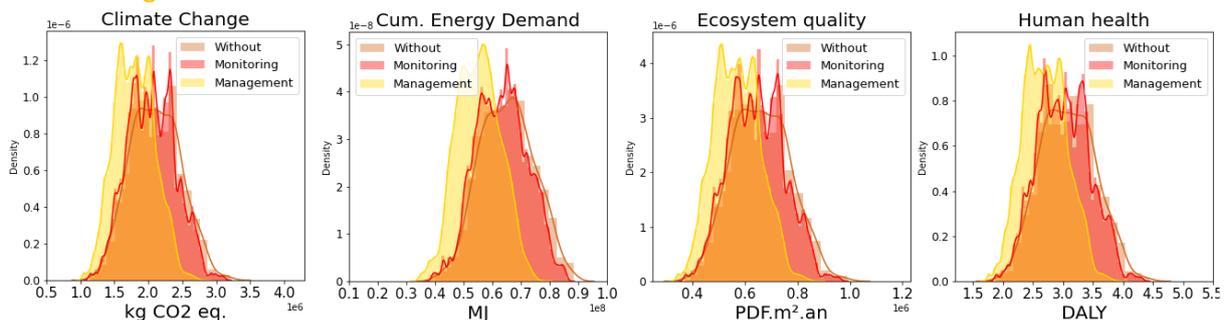


**Figure 11 : Effet de la variabilité de l'occupation sur les variantes non connectée pour le cas d'étude 1. Issu de (Pannier et al. 2022).**

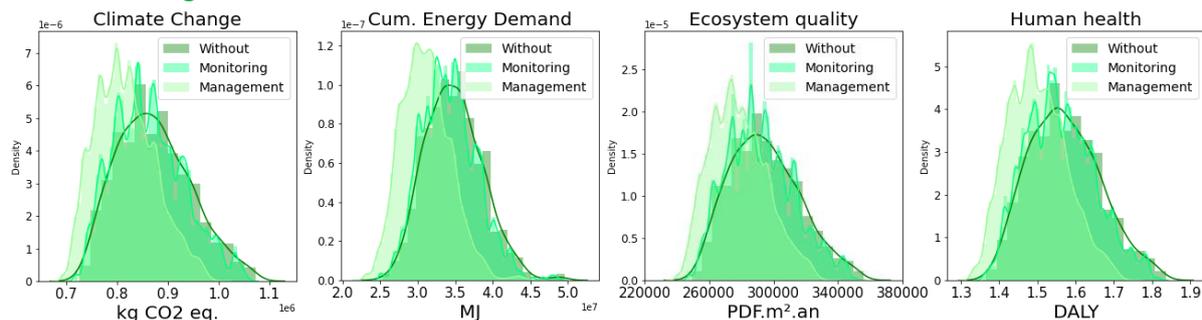
### 6.2.2. Comparaison des variantes connectées et non connectées

Les comparaisons de variantes sont données dans la Fig. 4 en utilisant trois distributions : une distribution pour la variante « non connectée » (*without*), une autre pour la stratégie « suivi énergétique » (*monitoring*) et une dernière pour la stratégie « gestion énergétique » (*management*). Pour les variantes « suivi » et « gestion », les incertitudes sur les économies d'énergie sont incluses dans les distributions. La comparaison des alternatives est effectuée pour les deux conceptions (années 90 en orange, et passive en vert) et pour les quatre indicateurs environnementaux.

- 90s design



- Passive design



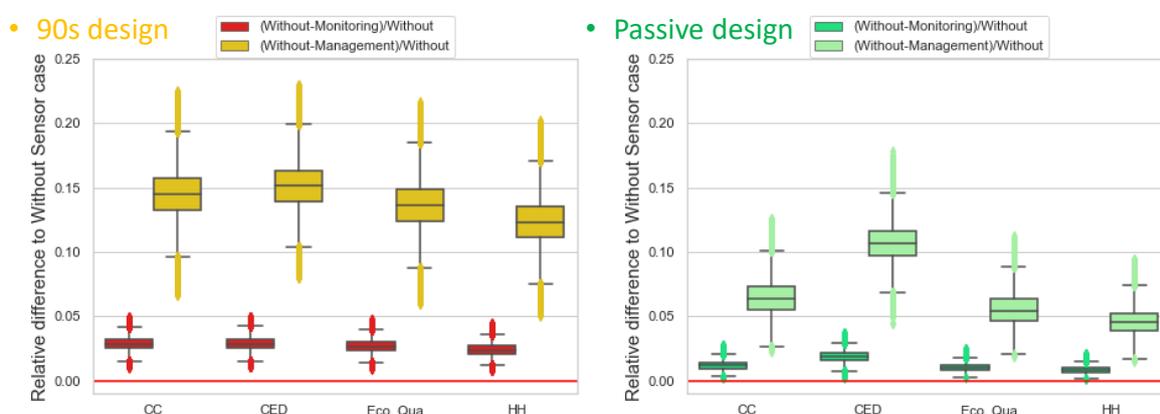
**Figure 12 : Comparaison des variantes de bâtiments connectés, pour la conception des années 90 (graphiques en haut) et la conception passive (graphiques en bas). Issu de (Pannier et al. 2022).**

Pour tous les indicateurs environnementaux et les variantes d'enveloppe de bâtiments, il y a une grande zone de recoupement entre les distributions des variantes « non connectée » et « suivi énergétique ». Comme la stratégie « gestion énergétique » conduit aux plus grandes économies d'énergie, cette variante semble être plus performante que les deux autres, même en considérant les impacts des dispositifs intelligents et toutes les étapes du cycle de vie. Notons que les impacts environnementaux globaux des objets connectés sont équivalents à seulement 1 à 3 % des impacts de la construction.

Il est difficile de conclure sur les avantages des bâtiments intelligents à partir de ces seules distributions, car le recoupement des distributions ne renseigne pas sur les dépendances entre les variantes. Afin d'extraire plus d'informations de la comparaison des variantes en présence d'incertitudes, les différences relatives entre les variantes sont calculées. Cela est fait pour chaque

simulation (840 ensembles de familles possibles × 1 000 scénarios d'économies), selon l'expression donnée dans l'équation (1).

Les écarts relatifs sont présentés à la Figure 13. Pour la conception des années 90, la différence relative est toujours positive, ce qui signifie que les variantes connectées (soit "suivi", soit "gestion") sont plus performantes que l'option "non connecté" pour chaque indicateur environnemental. Pour la conception passive, les écarts relatifs sont plus faibles que pour la conception des années 90. Ainsi, les avantages du bâtiment intelligent diminuent avec l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment. En outre, dans quelques cas, l'option "non connectée" est plus performante que l'option "suivi énergétique" (écarts relatifs pouvant être négatifs). Dans ces quelques cas, l'occupation induit des économies d'énergie très faibles (voire une augmentation de la consommation) et les économies ne contrebalancent pas les impacts des dispositifs intelligents.



**Figure 13 : Écarts relatifs entre les variantes connectées et non connectées pour le cas d'étude 1. Issu de (Pannier et al. 2022).**

### 6.2.3. Bilan du cas d'étude 1

Dans ce premier cas d'étude, différentes versions d'un immeuble collectif fictif ont été comparées à l'aide de l'ACV pour comprendre si les bâtiments intelligents sont plus performants que les bâtiments classiques, en tenant compte de plusieurs indicateurs environnementaux et de toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment. Les incertitudes concernant les économies d'énergie et les variations dues à l'occupation ont été prises en compte. Dans presque tous les cas étudiés, les bâtiments intelligents se sont avérés plus performants que les bâtiments classiques. Cependant, l'intérêt du bâtiment intelligent est moins important pour un « suivi énergétique » que pour une « gestion énergétique », ou lorsque le niveau d'isolation de l'enveloppe augmente.

Pour aller plus loin, le second cas d'étude traite d'un bâtiment connecté existant réellement ; intègre les impacts du stockage de données sur des serveurs ; et prend en compte des sources d'incertitudes supplémentaires sur les objets connectés.

### 6.3. Résultats du cas d'étude 2

Les résultats du cas d'étude 2 ont été produits par Clémence Lagarde. Cette partie a été rédigée sur la base de son rapport de stage (Lagarde 2022), qui constitue un autre livrable du projet et peut être mis à disposition sur demande.

#### 6.3.1. Résultats de la comparaison de variantes sans incertitudes

Les résultats déterministes, sans incertitudes, sont présentés dans les Figure 14 et Figure 15.

La Figure 14 donne les résultats à l'échelle des capteurs connectés des offres Kocliko de niveaux 1 et 2. Pour chaque indicateur, les deux barres correspondent aux deux variantes connectées. À l'intérieur de chaque barre, les couleurs correspondent aux étapes du cycle de vie. La variante de niveau 2, qui demande un équipement connecté en plus est toujours la plus défavorable, mais elle permet de limiter la consommation d'énergie du bâtiment en phase d'utilisation. Les impacts sont majoritairement associés à la fabrication et l'utilisation des capteurs. Pour le réchauffement climatique GWP, ces deux phases contribuent autant. La phase de fabrication contribue majoritairement à l'épuisement des ressources minérale (ADP) ; à l'inverse, la production de déchets radioactifs (qui correspond à l'utilisation d'électricité utilisée pour faire fonctionner les capteurs, majoritairement d'origine nucléaire en France), est quasi-exclusivement associée à l'exploitation des capteurs.

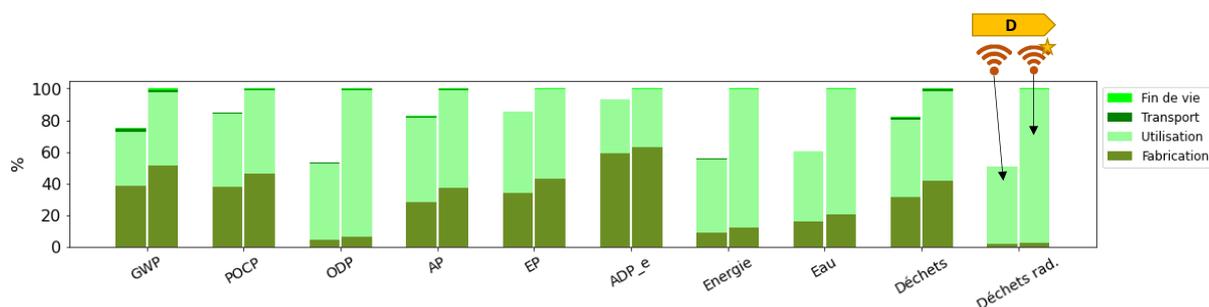
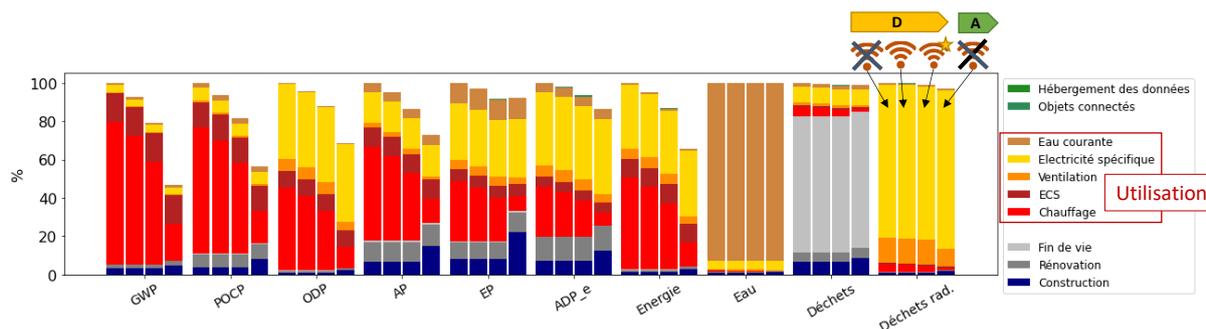


Figure 14 : Impacts environnementaux des capteurs connectés pour le cas d'étude 2.

La Figure 15 présente une analyse de contribution à l'échelle du cycle de vie complet du bâtiment. Pour chaque indicateur, les quatre barres correspondent aux quatre niveaux d'offre Kocliko. Pour la variante de base non connectée, les impacts du bâtiment non connecté dépendent en grande partie des besoins de chauffage. Sur les sept indicateurs environnementaux représentés, le poste chauffage de la variante de base est responsable d'en moyenne 52 % des impacts. Les impacts liés à l'utilisation de la variante de base comptent en moyenne pour 89 % des impacts.



**Figure 15 : Impacts environnementaux des bâtiments connectés pour le cas d'étude 2.**

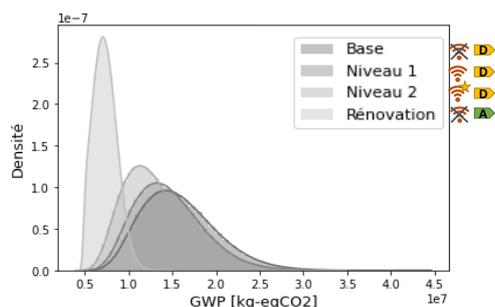
La réduction des consommations énergétiques du poste chauffage (offres de niveaux 1 et 2) permet de diminuer globalement les impacts du bâtiment. Les différentes catégories d'impact intermédiaires ne diminuent pas de façon uniforme. Celles dépendant le moins de la consommation de gaz naturel (utilisation d'eau douce, génération de déchets et génération de déchets radioactifs) sont peu touchées par les gains énergétiques. Nous constatons que les impacts générés par le système connecté (en vert au sommet des barres) sont infiniment faibles au regard des impacts totaux du bâtiment. Malgré l'ajout d'un coffret IoT supplémentaire, l'offre Kocliko niveau 2 est plus avantageuse sur le plan environnemental que l'offre niveau 1.

La catégorie d'impact qui est le plus affectée par la mise en place de capteurs connectés est l'épuisement des ressources minérales. Toutefois, il est estimé que l'offre Kocliko niveau 1 (respectivement niveau 2) réduit le potentiel d'épuisement des ressources minérales de 2 % (respectivement 7 %) par rapport à la variante de base. Ainsi, les variantes connectées sont favorables sur le plan environnemental. Les résultats sont cohérents avec l'état de l'art, puisqu'il a été mis en avant que les capteurs connectés sont efficaces lorsqu'ils sont installés dans des bâtiments peu performants.

La variante rénovée permet d'abaisser fortement la consommation de chauffage. En contrepartie, les impacts générés par l'enveloppe du bâtiment sont supérieurs à ceux du bâtiment de base. L'ajout d'une couche d'isolant et le remplacement des menuiseries affectent principalement la formation d'ozone photochimique, l'acidification des sols et des cours d'eaux, l'eutrophisation des cours d'eaux et l'épuisement des ressources minérales. Nous avons volontairement opté pour une isolation utilisant des matériaux standards non biosourcés (panneaux composites, laine de verre) afin de majorer ces impacts. Dans de rares cas (eutrophisation, production de déchets), l'offre Kocliko niveau 2 est légèrement plus avantageuse sur le plan environnemental que la variante rénovée non connectée. Cependant, la variante rénovée reste celle qui présente globalement les meilleures performances environnementales.

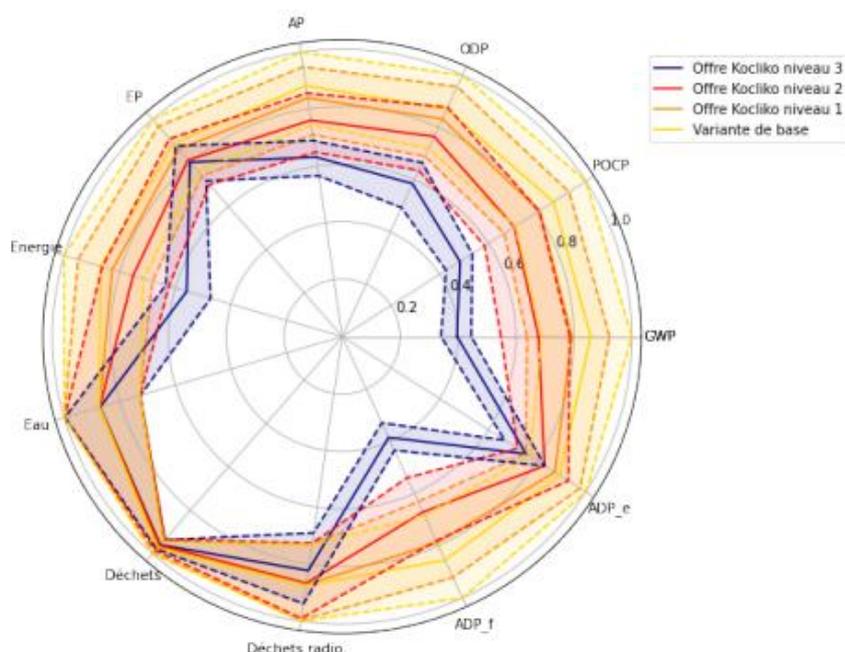
### 6.3.2. Résultats de la comparaison de variantes avec incertitudes

Les distributions des valeurs d'impacts sont tracées pour observer dans quelle mesure elles se recoupent. La Figure 16 montre la distribution des variantes du projet pour l'indicateur de changement climatique. Le recouvrement est assez important entre les trois variantes non renouvelées. Les impacts sont fortement diminués avec la variante renouvelée. Les distributions pour les autres catégories d'impacts sont données dans les annexes du rapport de stage de Clémence Lagarde (2022).



**Figure 16 : Comparaison des quatre niveaux d'offre Kocliko pour l'indicateur de changement climatique pour l'étude de cas 2.**

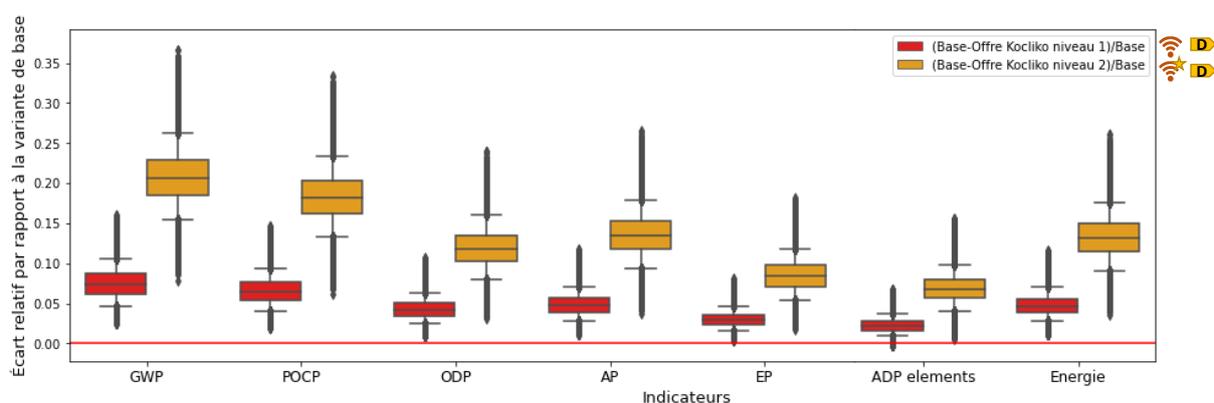
La Figure 17 est un diagramme radar qui représente les distributions de l'ensemble des catégories d'impacts évaluées, pour chacune des variantes modélisées. Le graphique est construit de la façon suivante : la limite basse d'une distribution de valeur, en pointillé, exclut 25 % des valeurs d'impacts les plus basses. La limite haute exclut 25 % des valeurs d'impacts les plus hautes. Ainsi, la zone colorée comprend les 50 % de valeurs d'impacts les plus probables. Elles sont également réparties autour de la moyenne, signalée par un trait fort.



**Figure 17 : Distribution des impacts des quatre niveaux d'offre Kocliko pour tous les indicateurs. Issue de (Lagarde 2022).**

La variante de base et les variantes connectées ont tendance à empiéter l’une sur l’autre, bien que les impacts moyens des variantes connectées soient plus faibles que ceux de la variante de base. Au vu des graphiques, il est difficile d’affirmer qu’une variante connectée est forcément avantageuse sur le plan environnemental par rapport au bâtiment de base. La distribution des résultats des variantes dépendant principalement des conditions d’exploitation du bâtiment (durée de vie, comportement des occupants etc.), le chevauchement des distributions des variantes connectées par rapport à la variante de base suggère que des performances environnementales similaires à celle d’un bâtiment connecté peuvent être atteinte par un bâtiment non connecté si les occupants adoptent d’eux-mêmes un comportement plus vertueux. L’intervalle de distribution de la variante rénovée est plus faible. Cela s’explique par le fait que l’amélioration de l’enveloppe et des performances du bâtiment le rend moins sensible à certains paramètres, tels que l’efficacité de la chaudière ou la durée de vie fonctionnelle du bâtiment. Il semble donc plus aisé de garantir la performance d’un bâtiment isolé, que de garantir la performance d’un bâtiment connecté.

Les distributions des écarts relatifs entre les offres de niveau 1 et 2 et la variante de base sont présentées à la Figure 18. Cet outil statistique nous permet donc d’évaluer la probabilité qu’une offre de Kocliko ait de meilleures performances environnementales que la variante de base, dans l’hypothèse de conditions d’occupation, de performances des équipements et de durée de vie du bâtiment équivalentes.



**Figure 18 : Écarts relatifs entre les variantes connectées et non connectées pour le cas d’étude 2.**

À l’exception de quelques cas extrêmes pour l’épuisement des ressources minérales et l’eutrophisation des cours d’eaux, on remarque que les deux variantes connectées sont plus favorables sur le plan environnemental. L’offre niveau 2 présente de meilleures performances environnementales que l’offre niveau 1.

### 6.3.3. Bilan du cas d’étude 2

Dans ce second cas d’étude, les performances environnementales de différentes versions d’un immeuble collectif connecté réel ont été comparées par ACV. Des incertitudes concernant les économies d’énergie réalisables, les caractéristiques des objets connectés et les variations dues à

l'occupation ont été prises en compte. Dans presque tous les cas étudiés, les variantes connectées (offres Kocliko niveau 1 et 2) sont environnementalement plus performantes que la variante de base non connectée, et ce malgré les incertitudes de modélisation. La thématique environnementale pour laquelle les gains associés à l'ajout d'objets connectés est le plus faible est l'épuisement des ressources minérales ; ce qui est cohérent avec le risque de dépendance aux métaux rares mentionné précédemment. Toutefois, les résultats ont montré que la rénovation du bâtiment est encore plus intéressante sur le plan environnemental que l'ajout de capteurs connectés.

## 7. Conclusions et perspectives

### 7.1. Conclusions

#### 7.1.1. Conclusions sur l'impact environnemental de bâtiments connectés

Alors que le recourt aux objets connectés est de plus en plus fréquent dans les bâtiments pour optimiser leurs consommations d'énergie en phase d'exploitation, le projet BEBAC se proposait d'évaluer si les bâtiments connectés sont réellement intéressants sur le plan environnemental. Il s'agissait de vérifier que les objets connectés ne causent pas davantage d'impacts lorsqu'on s'intéresse à différentes thématiques environnementales et au cycle de vie complet des bâtiments connectés. De rares études avaient soulevé ce sujet et elles n'étaient pas unanimes quant aux bénéfices réels des bâtiments connectés.

Dans ce contexte, BEBAC a permis de mettre en place une démarche pour comparer les impacts environnementaux de bâtiments connectés et non connectés. L'originalité de la méthodologie proposée réside dans la réalisation d'analyses de cycle de vie multicritères, dynamiques et stochastiques pour comparer différentes versions d'un bâtiment plus ou moins instrumentées et isolées. De plus, une base de données flexible d'utilisation a été constituée pour calculer les impacts environnementaux d'objets connectés et les incertitudes associées dans différentes configurations.

Les résultats des ACV comparatives, mises en œuvre sur deux cas d'étude de bâtiments collectifs résidentiels, montrent que les variantes connectées restent globalement favorables sur le plan environnemental, et ce malgré les incertitudes pesant sur la modélisation. La contribution des objets connectés est en effet très faible dans le bilan environnemental du bâtiment. Dans de rares cas, la variante connectée engendre des impacts plus importants sur l'eutrophisation ou l'épuisement des ressources minérales. Une rénovation énergétique permet des gains environnementaux plus importants que la mise en place de capteurs et d'actionneurs connectés. De plus, l'intérêt des bâtiments connectés décroît pour des bâtiments plus performants énergétiquement.

#### 7.1.2. Valorisation des travaux

##### 7.1.2.1. Valorisation scientifique

Les développements proposés et les résultats obtenus dans le cadre de BEBAC ont été valorisés au travers :

- Pour le cas d'étude 1 : d'une présentation orale et d'un article (Pannier et al. 2022) dans les actes de la conférence LCM2021 Stuttgart ;
- Pour le cas d'étude 2 : d'une présentation orale en 2022 lors de la journée thématique de la Société Française de Thermique (SFT) sur les « Systèmes énergétiques et bâtiments : applications, usages et optimisations »

Par ailleurs, un article est en cours de préparation pour soumission dans une revue scientifique. Il est envisagé de soumettre cet article soit au *Journal of Industrial Ecology* de Wiley (ce qui offrirait la possibilité de publication en *Open Source* gratuitement dans le cadre de l'accord avec l'Université d'Angers), soit dans le journal *Energy and Buildings*.

### **7.1.2.2. Valorisation grand public**

Outre la valorisation scientifique des travaux, trois actions de valorisation ont été menées auprès du grand public :

- Une présentation dans le cadre de la Semaine de l'innovation 2021 de l'Université d'Angers ;
- Une animation lors de la Fête de la Science 2022 à Angers ;
- Une interview dans une émission de Radio Campus réalisée dans le cadre de la Fête de la Science 2022 à Angers.

Il s'agissait, lors des trois actions de valorisation, de présenter les travaux menés à la fois dans le cadre de BEBAC, mais aussi dans le cadre d'autres projets autour des bâtiments connectés : le projet BioT<sup>5</sup> du RFI Wise de la Région Pays de la Loire, le projet ANR Plan de Relance CoLoC<sup>6</sup> et le projet ACQA<sup>7</sup> de l'AMI Sciences Participatives de l'Université d'Angers.

### **7.1.3. Impacts sur la carrière de la bénéficiaire du financement BEBAC**

Le projet BEBAC a permis à la bénéficiaire d'avoir de premières expériences en encadrement de stage. Les travaux menés dans le cadre des stages ont été fructueux : Clément Lagarde, en stage en 2022, a été récompensée pour son travail par le **Prix Roger Cadiergues 2022**, catégorie meilleur « Projet de fin d'études », décerné par l'AICVF le 12/01/2023.

En échangeant autour du projet BEBAC la bénéficiaire a pu développer son réseau. À l'échelle locale, grâce aux mises en relation permises par le mentor du projet Thierry Lemenand (LARIS, Université d'Angers), cela s'est traduit par :

- Un début de collaboration avec Alain Godon (Polytech Angers, Université d'Angers) et Franck Mercier (LARIS, Université d'Angers) sur le sujet de la mesure de la qualité de l'air intérieur des bâtiments grâce à des capteurs connectés. Cette collaboration s'est concrétisée par des échanges dans le cadre des projets BEBAC et BioT, ainsi que par le dépôt du projet ACQA en réponse à l'appel à manifestation d'intérêt Sciences Participatives 2022 de l'Université d'Angers.

---

<sup>5</sup> <https://laris.univ-angers.fr/fr/projets/projets-anterieurs/biot.html>

<sup>6</sup> <https://laris.univ-angers.fr/fr/projets/projets-actuels/coloc.html>

<sup>7</sup> <https://laris.univ-angers.fr/fr/projets/projets-actuels/acqa.html>

- Des discussions autour du traitement des données de capteurs connectés, renforcées par la participation de la bénéficiaire au groupe Intelligence Artificielle du LARIS, et par la participation commune avec les doctorants Rima Al Aridi (LARIS, Université d'Angers) et Bassel Chokr (LARIS, Université d'Angers) à l'école chercheur DATASUN 2022 sur le traitement de données de capteurs connectés.

À l'échelle nationale, le projet a permis à la bénéficiaire de participer la conférence IBPSA France 2022 et de renouer des contacts avec des chercheurs français en énergétique du bâtiment. Ainsi, la collaboration avec la société Kocliko, déjà posée dans le cadre du portage du projet ANR Plan de Relance CoLoC, a été renforcée avec le partage d'informations pour le cas d'étude 2 de BEBAC. De plus, au travers du réseau IBPSA France, la bénéficiaire aura l'opportunité d'organiser un webinaire sur l'ACV des bâtiments au printemps 2023. Par ailleurs, le recrutement de stagiaires à Polytech Annecy-Chambéry et l'INSA de Strasbourg a permis de reprendre contact avec des enseignants de ces deux écoles.

Enfin à l'échelle internationale, la bénéficiaire a eu l'opportunité de rapporter la thèse d'Alina Galimshina (soutenue le 27/01/2022 à l'ETH Zurich, Suisse) sur le sujet de l'étude des incertitudes dans les analyses de cycle de vie de rénovations de bâtiments.

## **7.2. Perspectives / retombées**

### **7.2.1. Perspectives scientifiques**

Si les résultats obtenus sont en faveur des bâtiments connectés, il faut garder à l'esprit qu'ils ont été obtenus pour des bâtiments résidentiels collectifs. Des études similaires sont à mener pour d'autres types de bâtiment pour s'assurer de la généralisation des conclusions. Il ressort de l'analyse que les bénéfices des bâtiments connectés diminuent pour des bâtiments plus performants énergétiquement, ou suréquipés en objets connectés. On peut alors se questionner sur l'intérêt environnemental d'un système de gestion énergétique pour une maison individuelle neuve et équipée d'un très grand nombre de capteurs et d'actionneurs communicants.

Dans ce projet, les résultats sont obtenus sur la base de simulations. En particulier, des hypothèses sont émises pour estimer la réduction de la consommation d'énergie permise par l'utilisation d'objets connectés. Il serait intéressant d'évaluer les gains énergétiques et environnementaux réels en suivant les consommations de bâtiments similaires, certains disposant d'une gestion énergétique optimisée et proposant des conseils aux usagers, et d'autres sans actionneurs ni retours aux usagers. Cela permettrait de mieux évaluer le niveau d'implication des occupants et d'identifier les éventuels effets rebonds liés à la mise en place d'objets connectés.

Pour approfondir cette étude, la modélisation de certains aspects mériterait d'être améliorée. Nous avons par exemple négligé certains impacts liés au stockage des données numériques (les méthodes d'estimation des impacts environnementaux du secteur du numérique dans un secteur

géographique étant encore peu abouties). La plupart des études tiennent seulement compte de la consommation d'énergie primaire des réseaux et des data centers et/ou des émissions de gaz à effet de serre engendrées. L'ADEME, en collaboration avec l'Arcep, met au point depuis 2020 une méthode multicritère permettant d'évaluer exhaustivement les impacts du secteur du numérique en France (ADEME et Arcep 2022). Il serait donc intéressant d'intégrer progressivement ces données au modèle.

Certaines sources d'incertitudes et de variabilités n'ont pas été prises en compte. Afin d'avoir une vision plus globale du problème, celles-ci pourraient être intégrées dans de futures études. En particulier, des analyses de sensibilité ont montré que les incertitudes sur les données d'arrière-plan (non incluses à cette étude) sont parmi les facteurs les plus influents en ACV des bâtiments (Pannier 2017). Des développements complémentaires sont toutefois requis pour permettre une bonne prise en compte des corrélations entre les systèmes d'arrière-plan.

Un autre aspect non traité au cours de ce projet concerne la prise en compte de l'évolution du bâtiment, de ses objets connectés et de ce qui les entoure (mix de production d'électricité, climat, ...) tout au long de leur vie. Des scénarios prospectifs sur l'évolution possible des variantes du bâtiment, pour différents jalons temporels, pourraient être développés. L'élaboration de tels scénarios, qui fait appel à un grand nombre d'hypothèses, en particulier pour des horizons temporels éloignés, nécessite une expertise en modélisation prospective pour ne pas aboutir à des résultats peu réalistes.

Par ailleurs, notons que le temps de calcul nécessaire pour l'obtention de ces résultats peut être longs (environ 7 h pour les STD intégrant la variabilité de l'occupation, et 2h30 pour les ACV des variantes connectées dans Brightway2). Une optimisation des temps de calcul et de traitement serait nécessaire pour permettre une application de la méthodologie développée par des bureaux d'études dans un contexte de prise de décision.

Enfin, pour aller plus loin, nous pourrions également intégrer à notre étude des critères économiques, afin d'avoir une vision plus complète des avantages et les contraintes globales d'une solution connectée par rapport à une solution rénovée.

L'évaluation de la performance environnementale se développe dans le secteur du bâtiment et il est utile de continuer à progresser vers une fiabilisation des outils afin d'améliorer la qualité de la prise de décision, en particulier concernant les choix d'instrumentation à déployer dans les bâtiments connectés.

### **7.2.2. Futurs projets**

Dans la continuité du projet BEBAC, et grâce aux contacts développés nationalement et internationalement, la bénéficiaire a eu l'opportunité de déposer plusieurs projets de recherche en lien avec l'ACV des bâtiments.

Suite aux échanges avec des enseignants-chercheurs de l'INSA de Strasbourg lors du stage de Clémence Lagarde, il a été proposé à la bénéficiaire de participer, en tant que porteuse d'un WP au

montage de l'ANR PRC SUBSTANCE, avec les laboratoires CERTES de l'Université Paris Est Créteil (portage du projet), I-CUBE de l'Université de Strasbourg et l'Université Gustave Eiffel. Le WP porté sera consacré à l'analyse des bénéfices environnementaux du remplacement du sable par des matériaux de réemploi dans les murs en béton. Le projet a été déposé le 07/11/2022 sur la plateforme de l'ANR et une réponse sur le choix de celui pour la seconde étape du processus de sélection est attendue pour février 2023.

De plus, un enregistrement a été réalisé pour l'ANR PRCI ECOPICO avec les laboratoires CES de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (portage du projet) et le LESBAT de Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (Suisse). L'objectif de ce projet est d'améliorer la prise en compte des incertitudes de premier plan et d'arrière-plan dans les ACV de bâtiment, ainsi que d'y intégrer des scénarios prospectifs. Le dépôt du projet est prévu pour fin mars 2023. Il est également prévu que la bénéficiaire de BEBAC assure le portage d'un WP.

Enfin, suite aux échanges ayant eu lieu lors du montage du PRC SUBSTANCE, une réponse commune à l'appel à projet « Post-Doc UPEC 2023 » a été déposée avec des chercheurs du laboratoire CERTES, de l'Université Paris-Est Créteil, pour l'encadrement de 12 mois de post-doc sur « l'Étude comparative de l'influence des modes constructifs sur l'analyse de cycle de vie des bâtiments ».

\*\*\*



## Bibliographie

- ADEME et Arcep. 2022. « Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective - Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France, 2ème volet de l'étude ». [https://www.arcep.fr/uploads/tx\\_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-volet02\\_janv2022.pdf](https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-volet02_janv2022.pdf).
- AFNOR NF EN 15804. 2014. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. Norme, issued 2014.
- Amayri, Manar, Stephane Ploix, Nizar Bouguila, et Frederic Wurtz. 2020. « Database Quality Assessment for Interactive Learning: Application to Occupancy Estimation ». *Energy and Buildings* 209 (février): 109578. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109578>.
- Bavaresco, Mateus Vinícius, Simona D'Oca, Eneid Ghisi, et Roberto Lamberts. 2019. « Technological innovations to assess and include the human dimension in the building-performance loop: A review ». *Energy and Buildings* 202 (novembre): 109365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109365>.
- Beucker, Severin, Joseph D. Bergesen, et Thomas Gibon. 2016. « Building Energy Management Systems: Global Potentials and Environmental Implications of Deployment ». *Journal of Industrial Ecology* 20 (2): 223-33. <https://doi.org/10.1111/jiec.12378>.
- Bulle, Cécile, Manuele Margni, Laure Patouillard, Anne-Marie Boulay, Guillaume Bourgault, Vincent De Bruille, Viêt Cao, et al. 2019. « IMPACT World+: A Globally Regionalized Life Cycle Impact Assessment Method ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, février. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>.
- Castorani, Vincenzo, Marta Rossi, Michele Germani, Marco Mandolini, et Alessio Vita. 2018. « Life Cycle Assessment of Home Smart Objects: Kitchen Hood Cases ». *Procedia CIRP* 69 (janvier): 499-504. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.113>.
- Commission européenne. 2012. *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) (Recast) Text with EEA Relevance. OJ L. Vol. 197*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>.
- Dam, S. S. van, C. A. Bakker, et J. C. Buitter. 2013. « Do Home Energy Management Systems Make Sense? Assessing Their Overall Lifecycle Impact ». *Energy Policy* 63 (décembre): 398-407. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.041>.
- Dam, S. S. van, C. A. Bakker, et J. D. M. van Hal. 2010. « Home energy monitors: impact over the medium-term ». *Building Research & Information* 38 (5): 458-69. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.494832>.
- Frischknecht, Rolf, Franziska Wyss, Sybille Büsser Knöpfel, Thomas Lützkendorf, et Maria Balouktsi. 2015. « Cumulative Energy Demand in LCA: The Energy Harvested Approach ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (7): 957-69. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>.
- Gangoellés, Marta, Miquel Casals, Núria Forcada, Marcel Macarulla, et Alberto Giretti. 2015. « Environmental Impacts Related to the Commissioning and Usage Phase of an Intelligent Energy Management System ». *Applied Energy* 138 (janvier): 216-23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.070>.

- . 2016. « Energy Performance Assessment of an Intelligent Energy Management System ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (mars): 662-67. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.006>.
- Henriksson, Patrik J. G., Reinout Heijungs, Hai M. Dao, Lam T. Phan, Geert R. de Snoo, et Jeroen B. Guinée. 2015. « Product Carbon Footprints and Their Uncertainties in Comparative Decision Contexts ». *PLoS ONE* 10 (3): 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121221>.
- Herfray, G. 2011. « Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <http://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00658220/>.
- Hoxha, Endrit, Guillaume Habert, Sébastien Lasvaux, Jacques Chevalier, et Robert Le Roy. 2017. « Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability ». *Journal of Cleaner Production* 144 (février): 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>.
- IPCC Working Group I. 2013. « Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». Cambridge University Press.
- Ipsen, Kikki Lambrecht, Regitze Kjær Zimmermann, Per Sieverts Nielsen, et Morten Birkved. 2019. « Environmental Assessment of Smart City Solutions Using a Coupled Urban Metabolism— Life Cycle Impact Assessment Approach ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24 (7): 1239-53. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1453-9>.
- ISO 14040. 2006. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes de cadre - Remplace les normes NF EN ISO 14040 de 1997, NF EN ISO 14041 de 1998, NF EN ISO 14042 et NF EN ISO 14043 de 2000, issued 2006.
- ISO 14044. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, issued 2006.
- Jolivet, Raphaël, Julie Clavreul, Raphaël Brière, Romain Besseau, Anne Prieur Vernat, Marie Sauze, Isabelle Blanc, Mélanie Douziech, et Paula Pérez-López. 2021. « Lca\_algebraic: A Library Bringing Symbolic Calculus to LCA for Comprehensive Sensitivity Analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26 (12): 2457-71. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01993-z>.
- Kumar, Tarun, et Monto Mani. 2017. « Life Cycle Assessment (LCA) to Assess Energy Neutrality in Occupancy Sensors ». In *Research into Design for Communities, Volume 2*, édité par Amaresh Chakrabarti et Debkumar Chakrabarti, 105-16. Smart Innovation, Systems and Technologies. Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3521-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3521-0_9).
- Lagarde, Clémence. 2022. « Rapport de Projet de Fin d'Etudes de Clémence Lagarde - BILAN ENVIRONNEMENTAL D'UN BÂTIMENT CONNECTÉ ». INSA de Strasbourg et LARIS. <http://eprints2.insa-strasbourg.fr/>.
- Louis, Jean-Nicolas, Antonio Calo, Kauko Leiviskä, et Eva Pongrácz. 2015. « Environmental Impacts and Benefits of Smart Home Automation: Life Cycle Assessment of Home Energy Management System ». *IFAC-PapersOnLine*, 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, 48 (1): 880-85. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.158>.
- Louis, Jean-Nicolas, et Eva Pongrácz. 2017. « Life Cycle Impact Assessment of Home Energy Management Systems (HEMS) Using Dynamic Emissions Factors for Electricity in Finland ».

- Environmental Impact Assessment Review* 67 (novembre): 109-16.  
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.08.009>.
- Marsh, Ellen, Stephen Allen, et Laura Hattam. 2022. « Tackling Uncertainty in Life Cycle Assessments for the Built Environment: A Review ». *Building and Environment*, décembre, 109941.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109941>.
- Mutel, Chris. 2012. « Brightway2 - Advanced life cycle assessment framework ». 2012.  
<https://brightwaylca.org/>.
- . 2017. « Brightway: An Open Source Framework for Life Cycle Assessment ». *Journal of Open Source Software* 2 (12): 236. <https://doi.org/10.21105/joss.00236>.
- Pannier, Marie-Lise. 2017. « Etude de la quantification des incertitudes en ACV des bâtiments ». Paris, février 14.
- Pannier, Marie-Lise, Thomas Remoué, et David Bigaud. 2022. « Stochastic Comparative LCA of Smart Buildings ». *E3S Web of Conferences* 349: 04012.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234904012>.
- Pannier, Marie-Lise, Patrick Schalbart, et Bruno Peuportier. 2019. « Chapitre 2 : Étude de la quantification des incertitudes en analyse de cycle de vie des bâtiments ». In *Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures - Tome 2*, Presses des MINES, 546. Collection Développement durable.
- Peuportier, Bruno, et Isabelle Blanc-Sommereux. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109--120. <https://doi.org/10.1080/01425919008909714>.
- Peuportier, Bruno, Stéphane Thiers, et Alain Guiavarch. 2013. « Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment ». *Journal of Cleaner Production* 39 (janvier): 73-78.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>.
- Pierucci, Alessandra, Alessandro Cannavale, Francesco Martellotta, et Francesco Fiorito. 2018. « Smart Windows for Carbon Neutral Buildings: A Life Cycle Approach ». *Energy and Buildings* 165 (avril): 160-71. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.021>.
- Polster, Bernd. 1995. « Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Popovici, Emil. 2005. « Contribution to the life cycle assessment of settlements ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Remoué, Thomas. 2009. « Rapport de stage de Thomas Remoué - BILAN ENVIRONNEMENTAL D'UN BÂTIMENT CONNECTÉ ». Polytech Annecy-Chambéry et LARIS.
- Reynolds, Jonathan, Yacine Rezgui, Alan Kwan, et Solène Piriou. 2018. « A Zone-Level, Building Energy Optimisation Combining an Artificial Neural Network, a Genetic Algorithm, and Model Predictive Control ». *Energy* 151 (mai): 729-39.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.113>.
- Robillart, M., P. Schalbart, et B. Peuportier. 2017. « Derivation of simplified control rules from an optimal strategy for electric heating in a residential building ». *Journal of Building Performance Simulation* 0 (0): 1-15. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1349835>.
- Schalbart, Patrick, Eric Vorger, et Bruno Peuportier. 2021. « Stochastic Prediction of Residents' Activities and Related Energy Management ». In *Towards Energy Smart Homes: Algorithms,*

- Technologies, and Applications*, édité par Stephane Ploix, Manar Amayri, et Nizar Bouguila, 543-604. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76477-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76477-7_17).
- Scheepens, Arno E., et Joost G. Vogtländer. 2018. « Insulation or Smart Temperature Control for Domestic Heating: A Combined Analysis of the Costs, the Eco-Costs, the Customer Perceived Value, and the Rebound Effect of Energy Saving ». *Sustainability* 10 (9): 3231. <https://doi.org/10.3390/su10093231>.
- Vorger, E. 2014. « Étude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Walzberg, Julien, Thomas Dandres, Nicolas Merveille, Mohamed Cheriet, et Réjean Samson. 2020. « Should We Fear the Rebound Effect in Smart Homes? » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 125 (juin): 109798. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109798>.
- Walzberg, Julien, Thomas Dandres, Réjean Samson, Nicolas Merveille, et Mohamed Cheriet. 2017. « An agent-based model to evaluate smart homes sustainability potential ». In *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292682>.
- Weidema, B. P., Bauer, R Hischier, C Mutel, T Nemecek, J Reinhard, CO Vadenbo, et G Wernet. 2013. « Overview and methodology, Data quality guideline for the Ecoinvent database version3, Ecoinvent Report 1(v3), St. Gallen: The ecoinvent Centre ». Rapport méthodologique.