HAL open science

Approche comportementale pour le pilotage des consommations énergétiques dans le bâtiment

Nour El Houda Rabab Akkouche

To cite this version:

Nour El Houda Rabab Akkouche. Approche comportementale pour le pilotage des consommations énergétiques dans le bâtiment. Ecologie, Environnement. Université Paris sciences et lettres, 2023. Français. ⟨NNT : 2023UPSLM081⟩. ⟨tel-04614714⟩

HAL Id: tel-04614714

https://pastel.hal.science/tel-04614714v1

Submitted on 17 Jun 2024

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

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

Autorisation HAL

HAL Authorization

PSL UNIVERSITÉ PARIS

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à Mines Paris – PSL

Approche comportementale pour le pilotage des consommations énergétiques dans le bâtiment

Soutenue par
Rabab AKKOUCHE
Le 19 décembre 2023

Ecole doctorale n° 84
Sciences et Technologies de l'information et de la Communication

Spécialité
Contrôle, Optimisation, Prospective

Composition du jury :

Nathalie LAZARIC Directrice de Recherche, CNRS	Présidente du jury
Monika WOLOSZYN Professeure des universités, Université Savoie Mont Blanc	*Rapporteure*
Laura DRAETTA Maître de conférences, Télécom Paris	*Examinatrice*
Bruno PEUPORTIER Directeur de recherche, Mines Paris - PSL	*Examinateur*
Sandrine SELOSSE Chargée de recherche HDR, Mines Paris - PSL	*Directrice de thèse*
Gilles GUERASSIMOFF Professeur, Mines Paris - PSL	*Directeur de thèse*

MINES PARIS | PSL

Résumé

Dans le contexte actuel, les efforts de réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments doivent prendre en compte de nombreux paramètres, le bâtiment, son environnement, ses équipements et surtout le comportement de ses utilisateurs. Les nudges, issus de l'économie comportementale et trouvant des applications dans divers domaines (financier, alimentation, santé, etc.), ont notamment été explorés dans le contexte environnemental en général, et spécifiquement dans celui de la consommation d'énergie dans les bâtiments.

L'objectif de notre travail est de mettre en œuvre des comportements d'économie d'énergie par le biais de nudges dans un bâtiment et de mesurer leur impact à l'aide de compteurs intelligents. Notre approche implique des simulations thermiques dynamiques, l'utilisation de capteurs connectés et la création de profils d'occupants par le biais de questionnaires. Ces éléments sont généralement traités de manière individuelle et isolée dans la littérature.

Nous évaluons d'abord de façon théorique les écogestes qui ont l'impact le plus significatif dans la réduction des consommations d'énergie dans un bâtiment tertiaire public situé en France. Nous créons un cadre basé sur des théories psychologiques et des travaux antérieurs afin de définir des concepts sur lesquels nous nous basons pour définir différents profils de consommateurs d'énergie. Nous menons une expérimentation afin de mesurer, à l'aide de compteurs intelligents, l'impact de l'utilisation de nudges sur le changement de comportement des occupants d'un immeuble de bureaux. Pour ce faire, nous mettons en place une plateforme permettant de délivrer différents types de nudges à différents profils que nous avons établis à partir d'une classification basée sur des théories du comportement. Nous avons ainsi combiné deux volets technologique et comportementale, souvent traités séparément et pour lesquels les travaux de recherche nécessitent souvent une approche pluridisciplinaire.

La simulation de différents types d'utilisation de l'énergie dans un même bâtiment est également intéressante pour étudier l'impact du comportement des occupants sur la consommation d'énergie et la manière dont l'utilisation d'incitations personnalisées pour sensibiliser et favoriser l'adoption d'économies d'énergie peut conduire à une réduction significative de la consommation d'énergie dans le bâtiment.

Les résultats obtenus sont positifs en ce qui concerne les gains en énergie à condition qu'une connaissance préalable des occupants soit établie.

Abstract

In the current context, efforts to reduce energy consumption in buildings must take into consideration a wide range of parameters, the building, its environment, its equipment and, above all, the behavior of its users. Nudges, which emerged from behavioral economics and find applications in various fields (finance, food, health, etc.), have been explored in the environmental context in general, and specifically in that of energy consumption in buildings.

The aim of our work is to implement energy-saving behaviors through nudges in a building and to measure their impact using smart meters. Our approach involves dynamic thermal simulations, the use of connected sensors, and the creation of occupant profiles through questionnaires. These elements are typically addressed individually and isolated in the literature.

We start with a theoretical assessment of the energy-saving actions that have the most significant impact in reducing energy consumption in a public tertiary building located in France. We create a framework based on psychological theories and previous works to define concepts that we use to define different energy consumers profiles. We conduct an experimentation using smart meters to measure the impact of nudges on behavioral change among occupants of an office building. To do this, we implement a platform for delivering various types of nudges to different profiles that we have established from a classification based on behavioral theories. In this way, we have combined the technological and behavioral aspects, which are often dealt with separately, and for which research often requires a multidisciplinary approach.

Simulating different types of energy use scenarios in the same building is also interesting for studying the impact of occupants' behavior on energy consumption, and how the use of tailored incentives to raise awareness and encourage the larger adoption of energy savings measures can lead to a significant reduction in energy consumption in the building.

The results obtained are positive in terms of energy savings, provided that prior knowledge of occupants is established.

Remerciements

« Celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas Dieu »

À la fin de cette longue aventure qui est un fascinant mélange de peur, d'hésitation, de questionnements, de remise en question, de stress, de longues heures de réflexion, mais aussi ….. de fierté, de persévérance, d'accomplissement, de courage, de rires et de réussite, il est indispensable de dire merci à toutes les personnes qui étaient à mes côtés tout au long de ce parcours.

Je commence donc par remercier l'ensemble du personnel du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA) de Mines Paris PSL à Sophia Antipolis pour l'accueil et l'accompagnement durant ces années de thèse.
Je remercie aussi mes directeurs de thèse : Sandrine SELOSSE et Gilles GUERRASSIMOFF
Sandrine, je te remercie pour ton professionnalisme, tes valeurs humaines et ton soutien dans les moments les plus difficiles.
Gilles, merci pour tes idées, tes encouragements, nos discussions qui ont permis de faire évoluer ce travail.
Je remercie Damien Corral pour son aide dans la collecte des données des capteurs.

Un merci à mes collègues de bureau qui m'ont accompagné durant cette thèse : Amir et Zixuan. Merci pour les discussions passionnantes, les rires et les échanges.
Je remercie également Amel SAHLI pour le flot inépuisable de conseils qu'elle a pu me fournir à chaque fois que j'en avais besoin, ainsi que pour son soutien. Aux amitiés que j'ai pu tisser au sein du CMA:
Dhekra, jusqu'au dernier moment tu as su m'encourager et booster mon courage. Heureuse qu'on ait fini toutes les deux à quelques jours près,
Yacine, Sophie, Arnauld, Gildas, Cindy, Amal, Matthieu, Carlos

J'ai entrepris cette voie car je me cherchais. Les tâches « routinières » que je menais avant le début de la thèse dans mon bureau confortable ne suffisait pas pour assouvir ma curiosité, mon goût pour la recherche.
Je cherchais du challenge, je cherchais à me surpasser et à laisser une trace….
« Si la fin du monde arrivait alors que l'un d'entre vous tenait un plant à la main, qu'il le plante. »
La question du développement durable nous implique toutes et tous. Il est de notre responsabilité de protéger cette planète et de la préserver pour les générations à venir. C'est à partir de cet engagement que j'ai trouvé dans cette thèse l'opportunité de laisser une trace …
La question du développement nous concerne toutes et tous. Il nous incombe la responsabilité de protéger notre précieuse planète et de la préserver pour les générations futures. C'est au vu de cet engagement que j'ai trouvé dans cette thèse l'opportunité de laisser une trace …

Je dédie ce travail et tous les bienfaits qu'il peut apporter à l'âme de mon grand frère, mon pilier, mon complice depuis notre enfance. Je défends ma thèse un an jour pour jour après ton départ de ce monde. En ton honneur, ton jour de départ devient mon jour de réussite, notre réussite...
Merci de m'avoir encouragée à postuler pour cette thèse, alors que c'était toi à l'origine qui aspirais à la poursuivre... Merci pour nos longues conversations téléphoniques au sujet de ce travail... Merci pour tes conseils, tes idées, tes encouragements... Merci d'avoir porté ce projet

dans ton cœur avec le même stress que le mien... Merci pour toutes les fois où tu regardais avec attention mes présentations et écouté attentivement les questions pour en tirer des idées capables d'améliorer ce travail. Cela m'attriste que tu n'aies pas pu voir le fruit de ton travail et ton soutien, mais je souhaite que tu sois heureux là où tu es car tu le mérites. A mes yeux tu es et tu resteras LE chercheur que tu as tant espéré être. Je t'aime « weldi »

Le plus grand des merci, je l'adresse à mes parents (Oumi et Abi). À ce jeune couple d'architectes courageux qui a quitté sa terre natale pour édifier une nouvelle vie ailleurs. À ces deux vaillants guerriers qui ont placé le bien-être de leurs enfants au-dessus de tout. Merci de m'avoir transmis votre passion pour le domaine du bâtiment, merci pour les valeurs précieuses que vous m'avez enseignées, et pour tous les sacrifices consentis afin que je puisse bénéficier de la meilleure éducation possible.
Je remercie aussi énormément mes précieux frères et sœurs, sources inépuisables de joie et de réconfort au quotidien. À Chaimae, la tendresse même, veillant sur chacun avec une douceur infinie. À Rahil, gardienne bienveillante de nos cœurs, distillant les mots qui guérissent et apaisent. À Simo, jongleur de sourires, déployant son humour pour égayer nos journées. Et à Houssam, le rêveur aux plans grandioses, le futur architecte, que je souhaite voir s'épanouir pleinement dans l'art de bâtir.

Un grand merci à mes amis qui m'ont accompagné tout au long de cette aventure et à avec qui j'ai partagé les meilleurs des moments et les plus beaux des souvenirs au FJT Valbonne: Fatima, Sarah, Sara, Annick, Yasmine, Abdou, Mohamed, Ali. Une pensée à ceux qui sont partis vers de nouvelles aventures : Adiba, Ilhem, Salim, Driss, Arij, Rima.

A mes amies de vie : Malak, Yassamine, Sara, Aicha, Imane.

Finalement, je me tourne vers mon compagnon d'âme, mon meilleur ami, mon époux Tarik, avec une gratitude infinie. Pour toutes ces soirées où nos paroles tissaient l'étoffe de ma thèse. Pour ta présence lumineuse, ta main tendue et tes sages murmures. Pour l'art subtil de guider mes pas dans les moments de doute et d'incertitude.

À tous ceux qui ont croisé ma route, et que j'ai omis de nommer, emportés peut-être par le souffle du sud et la caresse de l'air marin. À toute personne que j'ai pu croisée et qui a pu m'aider avec une idée, un mot ou même un sourire. Mes interactions avec le public, au vue de l'originalité du sujet, n'étaient pas minimes et représentent une de pierres de mon parcours doctoral La découverte du monde de la vulgarisation scientifique représente l'une des richesses de cette thèse. Je pense à tous ceux qui, par leurs interactions, ont ajouté une nouvelle couleur à l'édifice de ce travail.

De cette aventure, je conserve une panoplie d'émotions, tissant fierté, nostalgie, et la soif vers de nouveaux horizons. Les souvenirs s'entremêlent, de longues nuits de labeur, des lignes de code, des pages écrites, ponctuées de points d'interrogation, et puis ce cadre enchanteur à Sophia Antipolis, au milieu des arbres. En amoureuse de la nature, j'ai trouvé mon refuge idéal sur la côte d'Azur pour donner vie à ma thèse. Les montagnes, les plages de rêve, les promenades solitaires nourrissant mes réflexions, chaque sentier une source d'inspiration. Ainsi, à chaque fois que vous êtes tentés de laisser la lumière allumée inutilement, à négliger la gestion de votre chauffage, laissez ces images, mon souvenir, et cette thèse vous rappeler l'importance de chaque geste pour préserver notre planète.

Table des matières

Résumé 1

Abstract 2

Table des matières 5

Liste des figures 7

Liste des tableaux 10

Liste des acronymes 12

Introduction 13

Chapitre I : Le bâtiment : prise de conscience et consommations élevées 15

1 Prise de conscience mondiale des problèmes énergétiques 15

2 Le bâtiment, un secteur impactant 17

3 Les postes de consommations énergétiques dans les bâtiments français 20
3.1 Bâtiments résidentiels 21
3.2 Bâtiments tertiaires 24

4 La performance énergétique des bâtiments 26
4.1 Cadre réglementaire 26
4.2 Améliorer la performance énergétique des bâtiments 28

5 Conclusion du chapitre 36

Chapitre II : Comportement énergétique dans le bâtiment 38

1 Introduction 38

2 Mesurer le comportement énergétique 42

3 Simulation thermique dynamique et modélisation du comportement 46
3.1 Écart prédictions – consommations dans la STD 46
3.2 Modélisation des comportements dans la STD 50
3.3 Évaluation de l'impact du changement de comportement par STD 56

4 Théories du comportement 58
4.1 Théorie de l'action raisonnée (TAR) / Théorie du comportement planifié (TCP) 61
4.2 Valeurs – Croyances - Normes (VCN) 62
4.3 Théorie du comportement interpersonnel (TCI) 62
4.4 Récapitulatif 63

5 Facteurs dictant le comportement et le comportement pro-environnemental 63

6 Profilage du comportement énergétique et des occupants 65

7 Vers un comportement pro-environnemental 68
7.1 Méthodes de changement de comportement 68
7.2 Les Nudges 70

8 Conclusion du chapitre 75

Chapitre III : Simulation thermique dynamique de l'impact des écogestes dans le bâtiment 77

1 Introduction 77

2 Méthodologie 80
2.1 Acquisition des données 81
2.2 Choix de l'outil de simulation thermique dynamique 86

3 Simulation thermique dynamique du cas de base 87

4 Résultats et comparaison 104

5 Quantification de l'impact du changement de comportement par simulation thermique dynamique 110

6 Discussion et conclusion du chapitre 130

Chapitre IV : Étude expérimentale : nudges et simulation thermique dynamique 133

1 Questionnaire et création des profils de consommateurs 133
1.1 Hypothèses 133
1.2 Création du questionnaire 136
1.3 Les facteurs influents sur l'intention d'adopter des éco gestes 148

2 Profils des occupants 151
2.1 Méthodologie 151
2.2 Hypothèses des incitations – Choix des Nudges 159

3 Processus expérimental 164

4 Ecogestes encouragés 168

5 Moyen de communication avec les occupants 169

6 Résultats 171
6.1 Impact de l'utilisation des nudges sur la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment sujet de l'étude 171
6.2 Impact du type de nudge choisi 180
6.3 Impact des nudges sur le changement de comportements 186
6.4 Questionnaire Post Expérimentation 192

7 Discussion et conclusion du chapitre 193
7.1 Discussion 193
7.2 Conclusion du chapitre 194

Conclusion générale 196

Bilan du travail effectué 196

Perspectives 198

Bibliographie 200

Annexe 1 233

Annexe 2 265

Annexe 3 : Questionnaire Post Expérimentation 272

Liste des figures

Figure 1 : Consommation mondiale d'énergie primaire par énergie entre 1990 et 2019 15
Figure 2 : Quelques aspects de la transition énergétique 16
Figure 3 : Consommation d'énergie finale et d'énergie électrique par secteur 18
Figure 4 : Part des différentes branches dans les surfaces tertiaires 19
Figure 5 : Évolution des consommations d'énergie finale en TWh entre 1990 et 2019 du secteur tertiaire par branche 20
Figure 6: Évolution des surfaces chauffées du secteur tertiaire entre 1990 et 2019 en Mm^2 par branche 20
Figure 7: Évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel suivant le type d'énergie 22
Figure 8 : Évolution des consommations finales d'énergie dans le résidentiel par poste entre 1982 et 2020 ... 22
Figure 9: Énergies principales de chauffage et leurs consommations dans les logements en 2020 23
Figure 10 : Consommations finales d'énergie dans le tertiaire entre 2013 et 2020 par type d'énergi 24
Figure 11: Évolution des consommations d'énergie dans le tertiaire par poste entre 2013 et 2020 25
Figure 12: Évolution réglementaire en France depuis 1974 26
Figure 13: Déploiement des capteurs intelligents en Europe en 2020 34
Figure 14 : Impact des actions entreprises dans le cadre du concours CUBE2020 35
Figure 15: Schéma clustering et réseau entre les mots clés 39
Figure 16 : Mots clés les plus récurrents liés en comportement énergétique dans le bâtiment 40
Figure 17 : Résumé des thématiques et disciplines liées au comportement énergétique dans le bâtiment 42
Figure 18 : Étapes du processus de mesure 43
Figure 19 : Impact du comportement de l'occupant sur les consommations énergétiques 49
Figure 20: Résumé des disciplines des sciences humaines et sociales qui traitent du comportement des occupants 59
Figure 21 : Schéma résumant les théories TCP, TRA, TCI et VCN 63
Figure 22 : Profilage des occupants dans les travaux de littérature 65
Figure 23: Schéma général de l'approche pluridisciplinaire adoptée pour réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment 79
Figure 24 : Sélection du modèle du comportement de l'occupant en fonction de l'influence et de la prédictibilité des aspects du comportements 81
Figure 25: Capteur Shelly1PM installé au niveau du boitier d'éclairage 84
Figure 26: Processus d'acquisition des données par capteurs connectés 85
Figure 27: Emplacement géographique du bâtiment d'étude 89
Figure 28: Environnement urbain du bâtiment d'étude 89
Figure 29 : Vue 3D du bâtiment et de son environnement urbain 89
Figure 30: Définition des saisons de chauffe et de refroidissement dans le bâtiment 91
Figure 31: Schéma BUS de l'installation PAC + Ventilo-convecteurs 91
Figure 32 : Scénario de puissance dissipée pour le cas de base 94
Figure 33: Paramétrage des coefficients de foisonnement de l'éclairage 95
Figure 34 : Réponses des occupants sur leur ressenti général dans leurs bureaux 97
Figure 35: Génération des scénarios d'éclairage à partir du questionnaire 98
Figure 36: Interface de définition du mode d'ouverture détaillée dans le logiciel Pleiades Comfie 99
Figure 37: Génération des scénarios d'ouverture / Fermeture des fenêtres depuis questionnaire 100
Figure 38 : Comparaison des consommations annuelles des différents cas de référence 105
Figure 39 : Distribution des consommations électriques annuelles du système de chauffage en kW 109
Figure 40 : Distribution des consommations électriques annuelles du système de climatisation en kWh 109
Figure 41 : Distribution des consommations électriques annuelles du système d'éclairage en kWh 110
Figure 42 : Distribution des consommations électriques annuelles des équipements électriques en kWh 110

Figure 43 : Variation des consommations annuelles d'énergie du chauffage dans le bâtiment suivant le pourcentage d'adoption des éco-gestes *114*
Figure 44 : Consommations énergétiques annuelles du chauffage suivant les écogestes et les pourcentages de leur adoption obtenues par STD *115*
Figure 45 : Réductions de consommations d'énergie annuelles correspondantes aux différents écogestes *115*
Figure 46: Variation des consommations annuelles d'énergie de l'éclairage dans le bâtiment *116*
Figure 47: Pourcentage de réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment par adoption totale de tous les écogestes *117*
Figure 48 : Pourcentage d'adoption de certains comportements d'après les données du questionnaire *123*
Figure 49 : Schéma récapitulatif de la démarche adoptée pour l'étude de l'impact des différents niveaux de comportement sur les consommations d'énergie dans le bâtiment *125*
Figure 50 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour le système de chauffage *126*
Figure 51 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour le système d'éclairage *127*
Figure 52 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour les équipements électriques *127*
Figure 53 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour les systèmes de climatisation *128*
Figure 54: Positionnement des consommations annuelles totales du bâtiment par rapport aux niveaux de comportement *129*
Figure 55: Consommations d'énergie annuelles relatives aux différents niveaux de comportement *129*
Figure 56: Potentiel de réduction des consommations d'énergie par système *130*
Figure 57 : Schéma des facteurs pris en considération de l'étude inspiré de certaines théories du comportement *135*
Figure 58 : Répartition des tranches d'âges des répondants *144*
Figure 59 : Comportements énergivores dans le bâtiment repérés par les occupants *145*
Figure 60 : Confort perçu par les occupants relevé par le questionnaire *146*
Figure 61 : Réponses des occupants à la question : Quel terme associez-vous à la consommation d'énergie ? kWh ; Prix ; Augmentation ou réduction de consommation énergétique ; Impact carbone (CO2)) *147*
Figure 62: Matrice de corrélation des 17 variables étudiés *150*
Figure 63 : Représentation graphique des clusters obtenus suivants leurs centres finaux (k=4) *154*
Figure 64 : Représentation graphique des clusters obtenus suivants leurs centres finaux (k=5) *154*
Figure 65: Distribution suivant trois classes des valeurs des différents paramètres avec le nombre d'individus pour chaque classe *157*
Figure 66: Paramètres des 5 profils crées *159*
Figure 67 : Distribution des valeurs des paramètres liés au nudges pour chaque profil *163*
Figure 68: Interface Kilowatt pour l'envoi des nudges aux participants *169*
Figure 69: Exemple de messages envoyés aux occupants : suivi de consommations, compétition, rappels éco-gestes *170*
Figure 70 : Stickers avec des rappels des éco-gestes à effectuer lors de l'usage des différents systèmes du bâtiment *170*
Figure 71 : Stickers avec des images rappelant l'impact des consommations d'énergie sur le changement climatique *171*
Figure 72 : Consommation totale de chauffage du bâtiment en Wh *172*
Figure 73 : Consommations journalières des différents participants durant toute la durée de l'expérimentation *175*
Figure 74 : Consommations journalières des profils test durant toute la durée de l'expérimentation *176*
Figure 75: Moyennes des consommations hebdomadaires des différents profils tout au long de l'expérimentation *179*
Figure 76: Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le profil impliqué *181*

Figure 77: Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le participant 1 du profil moyen *182*
Figure 78 : Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le participant 2 du profil moyen *182*
Figure 79: Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le participant 3 du profil moyen *183*
Figure 80 : Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le profil qui manque de connaissances *183*
Figure 81 : Variation des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour les participants 1, 2 et 3 du profil qui favorise le confort *185*
Figure 82 : Variations des consommations d'énergie pour le profil insoucieux *186*
Figure 83 : Evolution quotidienne du passage d'un niveau à un autre *190*
Figure 84: Réductions de consommations d'énergie simulées suite aux résultats des nudges sur une année . *191*

Liste des tableaux

Tableau 1 : Chronologie des objectifs de performance énergétique par réglementation thermique *27*
Tableau 2 : Exigences d'efficacité énergétique par poste dans la RT2012 ..... *28*
Tableau 3 : Paramètres caractérisant les interactions de l'occupant avec le bâtiment *44*
Tableau 4 : Comparatif des logiciels de STD d'après (Darakdjian, 2017) *56*
Tableau 5 : Théories du comportement pro-environnemental selon les domaines *61*
Tableau 6 : Facteurs influençant le comportement pro-environnemental *65*
Tableau 7 : Résumé des travaux de recherche existants dans le profilage des consommateurs d'énergie dans le bâtiment *67*
Tableau 8 : Classification des nudges liés à l'énergie dans la littérature avec des exemples de travaux *74*
Tableau 9 : Données collectées à partir du questionnaire pour la simulation thermique dynamique *83*
Tableau 10 : Comparaison entre la STD et la SED *87*
Tableau 11 : Composition de l'enveloppe du bâtiment *90*
Tableau 12: Puissances des appareils électriques dans les bureaux d'après des travaux de la littérature *93*
Tableau 13 : Puissances électriques considérées pour les équipements électriques des bureaux *94*
Tableau 14 : Niveau d'éclairement à appliquer suivant l'usage de la pièce *94*
Tableau 15 : Coefficient de foisonnement d'utilisation C1 suivant le type de gestion de l'éclairage *95*
Tableau 16 : Consignes de chauffage et de climatisation correspondant au ressenti de l'occupant exprimé dans le questionnaire *97*
Tableau 17 : Motivations d'ouverture ou de fermeture de fenêtres d'après le questionnaire *99*
Tableau 18: Modèle du questionnaire sur les données d'ouverture des fenêtres *100*
Tableau 19 : Motivations d'ouverture ou de fermeture des systèmes d'occultation d'après le questionnaire ... *101*
Tableau 20 : Modèle du questionnaire sur les données d'ouverture des systèmes d'occultation *101*
Tableau 21 : État des systèmes d'occultation suivant les apports solaires *101*
Tableau 22 : Récapitulatif des données prises en considération pour l'établissement des différents types de cas de base *104*
Tableau 23 : Variabilité des scénarios du système de chauffage *107*
Tableau 24 : Variabilité des scénarios d'ouverture des systèmes d'occultation suivant les saisons *108*
Tableau 25: Pourcentage d'occupation des pièces du bâtiment suivant les heures de la journée *108*
Tableau 26 : Pourcentage globale d'utilisation des équipements électriques dans les différents bureaux *108*
Tableau 27 : Récapitulatif des écogestes à appliquer dans les bâtiments de bureaux Inspiré de : Eco-responsable au bureau, ADEME, 2020 ..... *113*
Tableau 28 : Différents écogestes concernant le système chauffage dont l'impact est à investiguer *114*
Tableau 29 : Niveaux de comportement liés à l'utilisation du chauffage *121*
Tableau 30 : Niveaux de comportements liés à l'usage de la climatisation *121*
Tableau 31 : Niveaux de comportement liés à l'usage des équipements d'éclairage *122*
Tableau 32 : Niveaux de comportement d'usage des équipements dans les bureaux *123*
Tableau 33 : Données d'entrée et de sortie de l'algorithme pour la génération des niveaux de comportement *124*
Tableau 34 : Différents cas de répartition des niveaux de comportement dans le bâtiment afin d'évaluer leur impact *125*

Tableau 35: Détermination des facteurs nécessaires pour l'étude à partir des réponses au questionnaire *143*
Tableau 36 : Centres finaux avec K = 4 et K = 5 ..... *153*
Tableau 37 : Liste des nudges à appliquer suivant les différents profils *162*
Tableau 38 : Résumé des nudges appliqués aux différents participants *167*
Tableau 39 : Récapiltulatif des écogestes rappelés aux occupants en début d'expérimentation *168*

Tableau 40 : Variation des consommations d'énergie de semaine en semaine pour les différents profils 177
Tableau 41 : Variation totale des consommations d'énergie pour chaque profil entre le début et la fin de l'expérimentation 178
Tableau 42 : Récapitulatif et classement de l'ensemble des réductions de consommations pour tous les profils 180
Tableau 43 : Récapitulatif de l'adoption des écogestes durant l'expérimentation pour le profil « insoucieux » 187
Tableau 44 : Récapitulatif de l'adoption des écogestes durant l'expérimentation pour le profil « impliqué» ... 187
Tableau 45 : Comparaison des réponses sur l'adoption des écogestes entre le questionnaire avant l'expérimentation et le questionnaire post expérimentation 193

Liste des acronymes

ACV	Analyse de cycle de vie
BACS	Building Automation & Control Systems
BBC	Bâtiments à basse consommation
BEPOS	Les bâtiments à énergie positive
CPL	Courant porteur en ligne
CUBE	Concours Usages Bâtiment Efficace
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
Elan	Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique
GES	Gaz à effet de serre
GPRS	General Packet Radio Service
GTB	Gestion Technique du Bâtiment
GTC	Gestion Technique Centralisée
LTECV	Loi de transition énergétique pour la croissance verte
PMR	Predicted Mean Vote
RT	Réglementation thermique
TAR	Théorie de l'action raisonnée
TCI	Théorie du comportement interpersonnel
TCP	Théorie du comportement planifié
VCN	Valeurs – Croyances - Normes

Introduction

Les enjeux énergétiques et environnementaux actuels impliquent une action immédiate de la part des pays afin de faire face au changement climatique. La France, en tant que membre de l'Union européenne s'est engagée dans un plan d'action pour réduire son empreinte carbone.
La transition vers une société verte, durable et neutre en carbone représente l'un objectifs challengeant du 21ème siècle. Les efforts actuels ne visent donc pas seulement à dépasser la crise énergétique, comme c'était le cas dans le contexte des chocs pétroliers, mais plutôt une réponse à des objectifs mondiaux visant à protéger la planète d'un réchauffement climatique dont les conséquences sont désormais incontestables : sécheresses, inondations, feux de forêts… La transition énergétique actuelle implique l'utilisateur final dans sa démarche de réduction de la demande en énergie. Le dernier volet du sixième rapport du GIEC publié en avril 2022 consacré aux solutions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) rappelle que les modes de vie et les comportements représentent un levier d'action pour lutter contre le réchauffement climatique.
On assiste donc à une réévaluation des politiques adoptées pour faire face aux enjeux climatiques actuels. La transition énergétique en France passe par plusieurs leviers, dont l'utilisation des énergies renouvelables et la réduction de l'impact carbone dans plusieurs secteurs, notamment celui du bâtiment, responsable de 45 % de la consommation d'énergie finale en France.

Une approche holistique implique d'aller au-delà des solutions technologiques et de s'adresser au consommateur final. Les politiques publiques peuvent se retourner vers d'autres domaines comme l'économie comportementale pour puiser des solutions à appliquer dans le domaine de l'énergie. Parmi les concepts qui émergent de plus en plus dans ce domaine, les nudges gagnent de plus en plus de popularité et ce, dans plusieurs secteurs de consommation comme l'alimentation ou le domaine financier. Les nudges, ces outils d'incitation « discrète » visant à modifier nos comportements au quotidien, présentent l'avantage d'être non coercitifs et faciles à mettre en place. Ils orientent les choix des individus sans nuire à leur liberté de décision.

C'est dans cette perspective que se positionne cette thèse qui cherche à examiner les rôles des nudges à travers une approche orientée vers la promotion des comportements énergétiquement responsables parmi les occupants des bâtiments en France. Si l'implication de l'utilisateur final de l'énergie devient une nécessité surtout dans des secteurs importants comme celui des bâtiments, la question à se poser concerne les méthodes et outils permettant d'atteindre cet objectif. L'information seule est-elle suffisante ? Quel moyen utiliser pour sensibiliser les occupants, sans obligation ou contrainte, à adopter les bons gestes dans le bâtiment ? Comment évaluer avec des solutions techniques à disposition l'impact du changement de comportement des occupants sur la réduction des consommations d'énergie ?

Ce manuscrit comporte quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale et les perspectives de ces travaux. Dans le premier, nous rappelons l'importance d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments compte tenu de la consommation en continuelle augmentation de ce secteur. Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'impact du comportement de l'occupant dans le bâtiment sur les consommations énergétiques, les méthodes pour le mesurer et la méthode de modélisation dans les simulations thermiques du bâtiment. Dans ce même chapitre, nous présentons comment le comportement est étudié par les théories du comportement afin de

pouvoir cerner l'aspect pluridisciplinaire de ce travail. Nous présentons aussi la théorie des nudges qui représente le moyen de changement de comportement adopté et étudié dans ce manuscrit. Dans le troisième et quatrième chapitre, nous proposons une approche pluridisciplinaire et novatrice qui implique une étude théorique par simulation thermique dynamique et une expérimentation dans un bâtiment de bureaux afin d'évaluer l'impact des nudges. Le troisième chapitre présente la première partie de cette approche qui se base sur l'utilisation des données collectées par capteurs et questionnaire pour générer les scénarios d'usage à utiliser dans les simulations thermiques dynamiques. Ce travail permet d'évaluer l'impact de l'application des nudges sur la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment étudié. D'un point de vue pratique, l'étude de l'efficacité de l'application des nudges sur le changement de comportement représente la deuxième partie de notre approche et fait l'objet du quatrième chapitre. Dans ce dernier, nous mettons en pratique certaines des méthodes, théories et outils présentés dans notre revue de littérature. Nous appliquons les théories de comportement sur un bâtiment de bureaux dans l'objectif de définir des profils de consommateurs auxquels nous proposons des hypothèses de nudges ; tout cela à travers les réponses des occupants au questionnaire proposé.

Chapitre I : Le bâtiment : prise de conscience et consommations élevées

Le contexte mondial connait une augmentation de la demande énergétique induisant de nouvelles réflexions quant à l'utilisation de l'énergie par les différents secteurs. Ce chapitre présente un rappel des caractéristiques de la problématique énergétique et montre l'impact fort du secteur du bâtiment du fait de ses consommations élevées, mais aussi comme levier d'action capable de réduire la consommation de l'énergie dans l'Union européenne de manière générale et en France en particulier. Ce choix est confirmé et consolidé par la réglementation française. Nous rappelons dans ce chapitre les chiffres clés de ce secteur et nous dressons un état des lieux des solutions déployées qui concernent le bâtiment et les occupants.

1 *Prise de conscience mondiale des problèmes énergétiques*

Le contexte énergétique et environnemental mondial est alarmant ces dernières années. La consommation d'énergie primaire mondiale connait une augmentation continue, d'en moyenne 1,5 % par an (**Figure 1**) et les énergies fossiles dominent encore largement le mix énergétique primaire mondial.

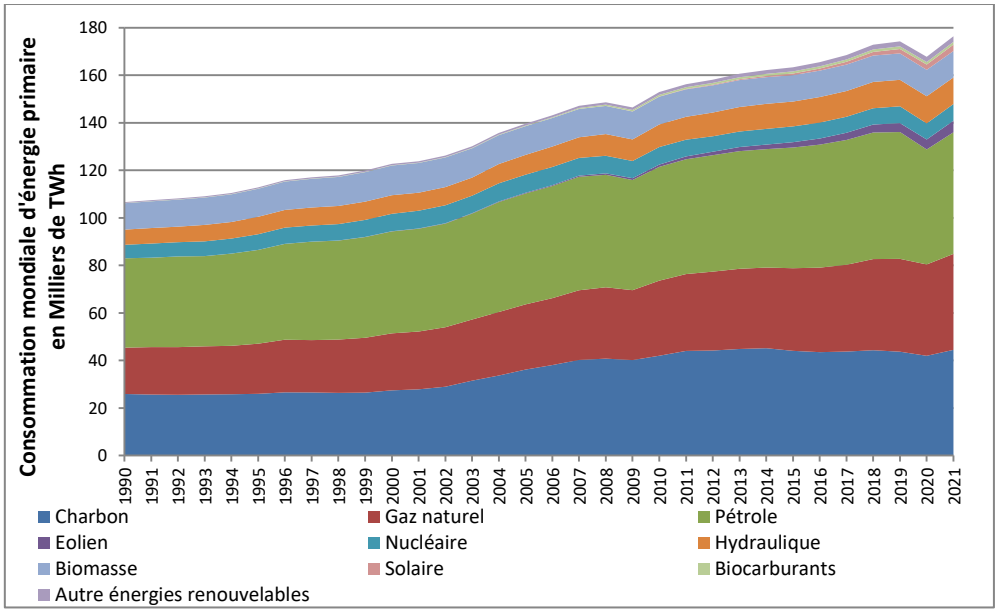


Figure 1 : Consommation mondiale d'énergie primaire par énergie entre 1990 et 2019
Source : www.iea.org

Cette augmentation continue des consommations énergétiques est responsable des problèmes suivants :

- Les émissions de CO_2 liées à l'énergie ont connu une augmentation de 39 % entre 1990 et 2019 et une progression de 112 % depuis 1973, les deux tiers du réchauffement climatique étant survenus après 1975 en raison de cette augmentation continue des émissions de CO_2. Si la crainte d'accès aux ressources fossiles et fissiles représentait auparavant une raison majeure pour motiver la réduction des consommations d'énergie, il a été estimé que les réserves de pétrole pouvaient satisfaire le niveau de consommation actuel pour encore une cinquantaine d'années et celles de charbon pour

encore le double. Près de 60 % des réserves de pétrole et 90 % de charbon déjà découvertes ne devraient cependant pas être extraites pour éviter de dépasser le niveau de réchauffement de 1,5 °C (Welsby et al., 2021) .

- Aux problèmes politiques et de sécurité d'approvisionnement dus à l'inégale répartition des ressources sur la planète et aux risques de nature géopolitique (instabilité politique d'une minorité d'états contrôlant 80 % des ressources en hydrocarbure) ainsi que la dépendance forte de nombreux pays, s'ajoute des enjeux sociaux liés à la pauvreté énergétique dans les pays du Sud où presque un cinquième de l'humanité n'a pas accès à l'électricité (Piet, 2019).

La transition énergétique bas-carbone repose sur le changement des modes de production et de consommation d'énergie afin de réduire les émissions de GES et limiter le réchauffement climatique. Suivant leurs ressources et leurs stratégies, les pays et gouvernements définissent des scénarios différents de transition énergétique qui consistent dans leur quasi-globalité à un basculement vers un mix énergétique basé principalement sur les énergies renouvelables ou au recours à des énergies moins émettrices de GES. La transition énergétique actuelle implique également des objectifs de réduction de la demande en énergie se basant sur le progrès technique pour assurer la même qualité de service avec le minimum de consommation d'énergie possible. C'est ce qu'on appelle l'efficacité énergétique. Elle se base aussi sur la sobriété énergétique qui consiste à changer les modes de vie en réduisant, voire supprimant, tout excès de consommation et activité consommatrice d'énergie.

Au niveau européen et français, la transition énergétique englobe également plusieurs aspects économiques, comportementaux, sociaux et techniques (**Figure 2**). Elle nécessite l'engagement de citoyens conscients et actifs afin d'assurer la maitrise de la consommation d'énergie et d'éviter la surproduction et les consommations superflues (Maalej and Amami, 2014).

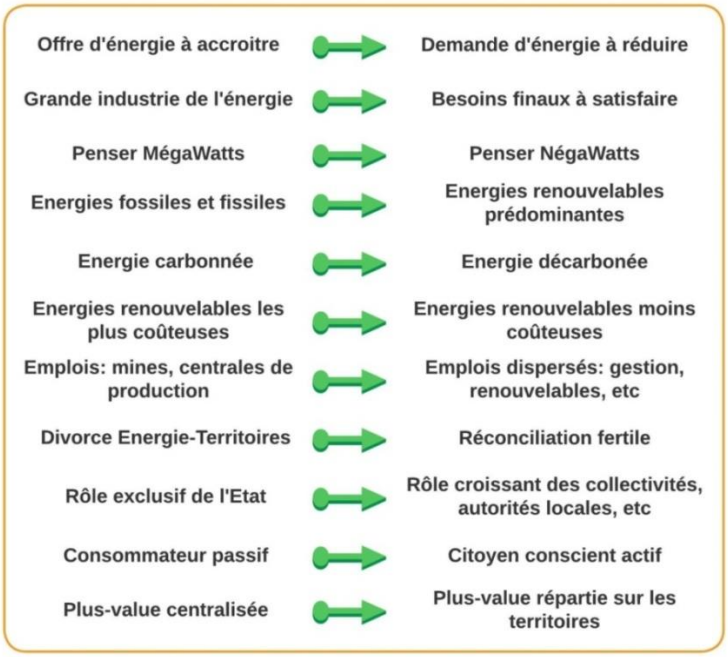


Figure 2 : Quelques aspects de la transition énergétique
Source : Auteur (Inspiré des travaux de (Magnin, 2014))

La France, pour répondre aux objectifs de l'Accord de Paris, s'est engagée depuis 2015 à travers la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) dans la réduction des émissions de GES, dans l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique et dans le développement de l'efficacité énergétique. Cette loi établie suite à l'organisation d'un débat national sur la transition énergétique (Conseil national du débat, 2013) fixe plusieurs objectifs opérationnels, à savoir(*LTECV*, 2015a) :

- Une diminution de 30 % de la consommation d'énergies fossiles en 2030 ;
- Une division par 4 des émissions de GES entre 1990 et 2050 ;
- Une division par 2 de la consommation finale d'énergie en 2050 par rapport à 2012 avec un objectif intermédiaire de 20 % en 2030.

La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), introduite par la LTECV, représente la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique. Elle précise les orientations à suivre dans tous les secteurs d'activités afin d'atteindre une économie bas-carbone, circulaire et durable. Ses deux objectifs principaux sont ainsi d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et de réduire l'empreinte carbone des consommations finales. Pour se faire, elle repose en premier lieu sur l'efficacité énergétique en prévoyant une diminution de 40 % de la consommation d'énergie finale en trente ans basée sur la réduction des consommations unitaires et la mise en œuvre de politiques publiques volontaristes telles que la rénovation thermique des bâtiments (RTE, 2021). La sobriété est elle aussi de plus en plus introduite dans le débat public visant la réduction des consommations finales d'énergie, ce qui nécessite des initiatives individuelles et collectives.

Les différentes mesures mises en place en France englobent plusieurs domaines clés de la transition énergétique à travers :

- La rénovation du parc des bâtiments existants ;
- L'amélioration de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs ;
- Le développement de la mobilité propre ;
- La lutte contre les gaspillages et la promotion de l'économie circulaire ;
- Le développement des énergies renouvelables ;
- Le renforcement de la sûreté nucléaire ;
- La lutte contre la précarité énergétique.

Le bâtiment est donc perçu comme un point clé et stratégique pour lutter contre le réchauffement climatique, et pour cause, ses consommations s'avèrent de plus en plus élevées.

2 *Le bâtiment, un secteur impactant*

En France, la consommation finale à usage énergétique, portée par la reprise économique après la crise sanitaire a rebondit par rapport à 2020 (+ 4,1 %) sans retrouver son niveau de 2019 (- 1,6 %). Par rapport à 2019, elle est en baisse dans les transports, l'industrie et le tertiaire mais progresse dans le résidentiel.
Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représente le secteur le plus consommateur d'énergie. Sa part dans la consommation d'énergie finale est de 45 % en 2022.
La part du tertiaire dans la consommation a progressé de 13 % à 16 % entre 1990 et 2022 alors que celle de l'industrie a diminué de 24 % à 19 % (Chiffres clés de l'énergie, 2022).
Les consommateurs finaux d'énergie ont dépensé 137 Md€ en 2020. C'est dans le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) que cette dépense est la plus élevée (50 %) suivi par les transports (38 %) (**Figure 3**).

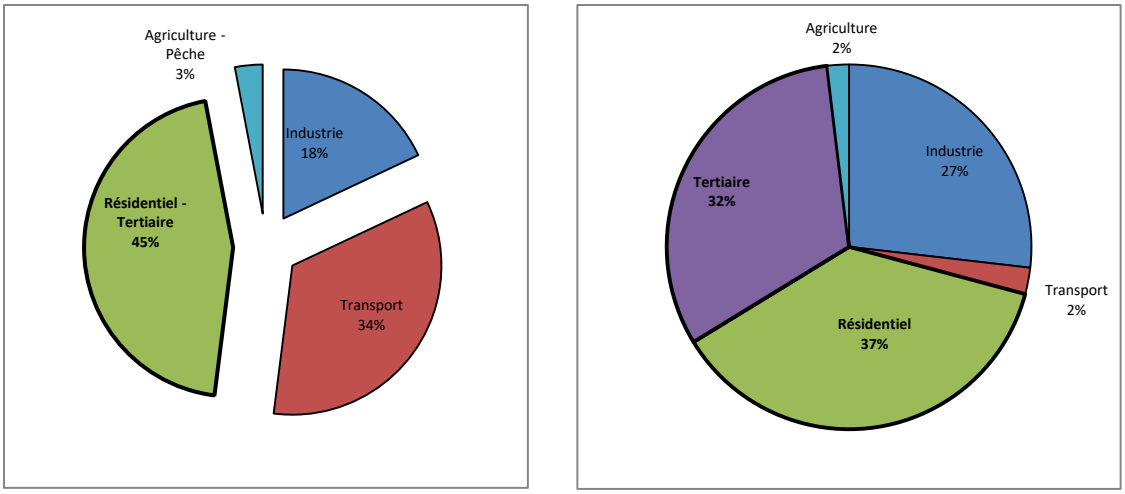


Figure 3 : A gauche : Consommation d'énergie finale par secteur. À droite : Consommation d'énergie électrique par secteur ; en France en 2020
Source : (*Chiffres clés de l'énergie*, 2022)

Le secteur du bâtiment représente un gisement d'économies d'énergie qui a été ciblé dès le premier choc pétrolier en 1973. Avant cette date, au vu des enjeux de l'époque, les efforts étaient orientés vers la création d'un parc de bâtiments répondant au confort des occupants et aux besoins de la population d'après-guerre. Mais à partir de 1974, la performance énergétique du bâtiment est introduite dans le panel des exigences de construction avec l'avènement des différentes réglementations thermiques afin de pouvoir réduire les consommations d'énergie finale de ce secteur, ce qui est important compte tenu des contraintes que connait ce secteur, en particulier dans le résidentiel :

- La surface du parc de logements en augmentation en réponse à l'évolution démographique.

- L'augmentation des surfaces à chauffer à cause des superficies de plus en plus importantes des maisons. L'augmentation du nombre de logements individuels et du nombre de pièces dans les logements implique lui aussi une augmentation des besoins de chauffage[1].

- Le poids des anciens bâtiments, qui contrairement aux nouveaux ne répondent pas aux exigences de la réglementation thermique et qui représentent une part importante du parc immobilier. Dans le cas du résidentiel par exemple, les logements construits avant la réglementation thermique représentent la majorité du parc, sur la période entre 1973 et 2015, et encore près de la moitié aujourd'hui. En 2018, les bâtiments résidentiels construits avant 1946 représentaient 21,7 % du total des bâtiments[2]. On retrouve la même caractéristique dans le cas des bâtiments tertiaires dont la majorité a été construite avant 1980 (Vermont and Domergue, 2020).

[1] https://www.insee.fr/fr/statistiques, Système d'analyse de la population par l'historique des recensements (Saphir) de 1968 à 2018.

[2] https://www.insee.fr/fr/statistiques, recensement de la population de 2018, exploitation complémentaire

Les bâtiments tertiaires couvrent un large panel de bâtiments qui peuvent aller de petites surfaces (petits bureaux) à d'énormes surfaces (hôpitaux ou aéroports). Le Ceren[3] classifie ces bâtiments en huit catégories suivant les activités qu'ils regroupent :

- Bureaux et administrations ;
- Cafés, hôtels et restaurants ;
- Commerces ;
- Établissements d'enseignement ;
- Établissements de santé ;
- Sport, culture, loisirs, équipements collectifs divers ;
- Habitat communautaire ;
- Transport.

Les bureaux, les commerces et les bâtiments d'enseignement et recherche représentent tout au long des années la majeure partie des bâtiments (**Figure 4**).

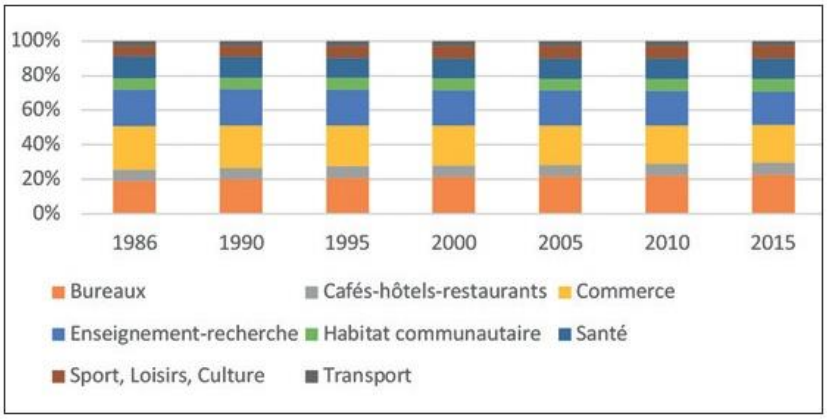


Figure 4 : Part des différentes branches dans les surfaces tertiaires
Source : https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/

Les consommations d'énergie finale du secteur tertiaire ont connu une augmentation régulière jusqu'en 2010 puis ont stagné autour de 224 TWh. Cette tendance diffère quelque peu selon les branches. Les bureaux et les bâtiments de sport et de loisirs connaissent une évolution plus rapide dans leurs consommations d'énergie suivis par les habitats communautaires. La moitié de la consommation d'énergie finale est générée par deux branches : les bureaux et les commerces (**Figure 5**). Cette augmentation des consommations est liée à un besoin de plus en plus important de la part des différents postes de consommations. Si on considère le poste de chauffage par exemple, l'évolution croissante des surfaces et des surfaces chauffées dans les différents bâtiments (**Figure 6**) implique un besoin croissant en chauffage, ce qui conduit à de plus en plus de consommations.

[3] Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie

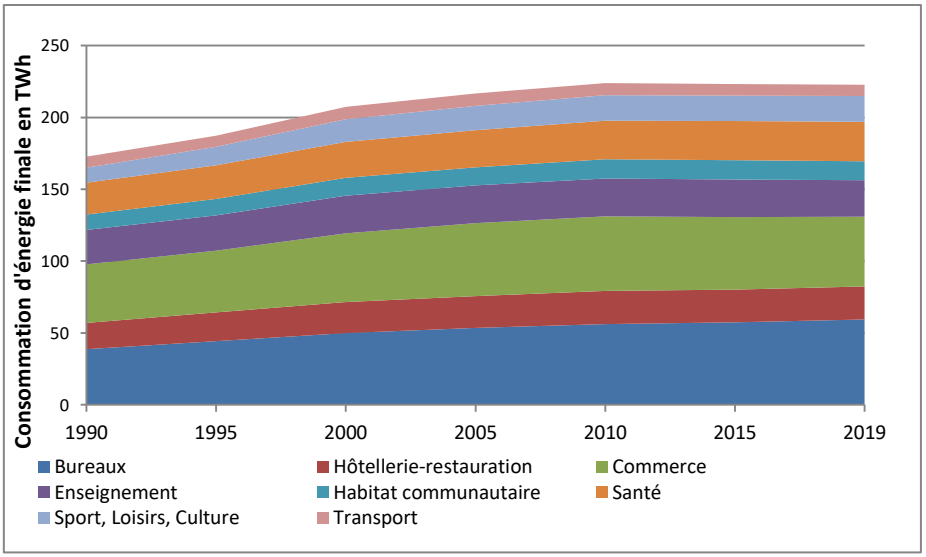


Figure 5 : Évolution des consommations d'énergie finale en TWh entre 1990 et 2019 du secteur tertiaire par branche
Source : https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/

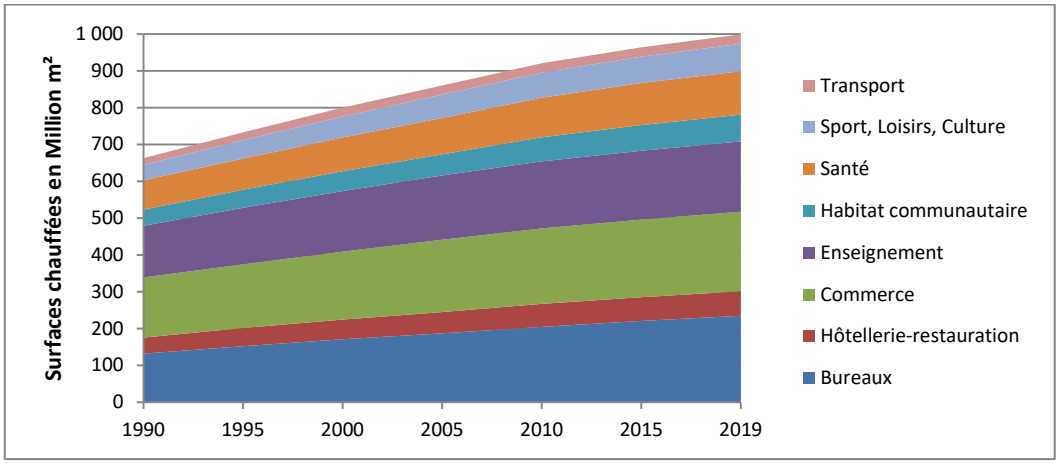


Figure 6: Évolution des surfaces chauffées du secteur tertiaire entre 1990 et 2019 en Mm² par branche
Source : https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/

En plus du chauffage, d'autres postes de consommations sont responsables de l'augmentation des consommations d'énergie dans le bâtiment selon ses fonctions. La partie suivante présente l'évolution des postes de consommations énergétiques dans les bâtiments français.

3 *Les postes de consommations énergétiques dans les bâtiments français*

Le mot « bâtiment » est défini par le Larousse comme « toute construction destinée à servir d'abri et à isoler ». Cette définition est principalement tirée de la fonction essentielle du bâtiment. Au-delà de cette fonction principale, le bâtiment en remplit bien d'autres mentionnées dans la littérature (Latortue et al., 2018 ; Chenailler, 2012) :

- Protection et sécurité ;
- Espace d'activité ;
- Confort (thermique, lumineux, olfactif et acoustique)

- Usage des biens et des outils ;
- Gestion des relations ;
- Intégration au site ;
- Fonction émotionnelle.

L'évolution du bâtiment a longtemps gravité autour de ces fonctionnalités avec un développement constant de la façon dont elles se sont maintenues accompagnant le développement humain, culturel et technologique. On peut noter une évolution répondant à la pyramide de Maslow, allant des besoins vitaux qu'on retrouve dans le cadre de vie primitif, aux exigences du confort contemporain. L'énergie et l'usage des services énergétique ont suivi ce développement en cherchant à maintenir le confort et la qualité de l'environnement intérieur, à améliorer le quotidien, à assurer la pérennité de la structure et à maintenir l'activité au sein du bâtiment, cela à travers le développement de nouvelles solutions énergétiques et la recherche de sources d'énergie plus performantes. Dès lors, l'énergie n'est plus seulement un moyen d'assurer les besoins du bâtiment, elle impacte de plus en plus son architecture. Les architectures s'adaptent aux systèmes énergétiques, pour mieux les intégrer, mieux préserver les bâtiments et moins consommer d'énergie (Hakala, 2022).

La performance énergétique des bâtiments est définie comme « la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut entre autres l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage » (Directive 2010/31/UE, 2010). Améliorer la performance énergétique du bâtiment nécessite un usage répondant aux normes standards du bâtiment et de ses systèmes techniques en réduisant au maximum toute surconsommation d'énergie ou consommations inutiles. Ces systèmes techniques, tels que définis par la Directive européenne (Directive 2010/31/UE, 2010) sont :

- Le chauffage des locaux ;
- Le refroidissement des locaux ;
- La production d'eau chaude sanitaire ;
- La ventilation ;
- L'éclairage intégré.

Nous allons dans ce qui suit décrire l'évolution de l'usage des différents systèmes énergétiques dans les bâtiments français et les technologies qu'ils utilisent afin de pouvoir déterminer les voies d'améliorations possibles liées à leur usage. Nous allons distinguer le secteur résidentiel du tertiaire chacun ayant ses propres spécificités.

3.1 *Bâtiments résidentiels*

Dans le secteur résidentiel, la part de l'usage de l'électricité dans la consommation totale de l'énergie finale est en continuelle augmentation. La part du gaz naturel quant à elle est restée stable tout au long des années. On remarque aussi une diminution de la part du fioul domestique et du gaz de pétrole liquéfié. Le charbon diminue pour ne représenter qu'une part négligeable en 2020 et le solaire thermique commence à apparaître dans les consommations finales d'énergie. La part du bois, quoiqu'importante, connait une diminution depuis 1990. On remarque aussi qu'une part des consommations électriques est due aux pompes à chaleur (PAC) et que leur part et en continuelle augmentation, atteignant 6 % en 2020 (**Figure 7**). Réduire les émissions de GES passe donc par une réduction des consommations électriques et un basculement des énergies comme le fioul et le gaz naturel vers des énergies moins carbonées.

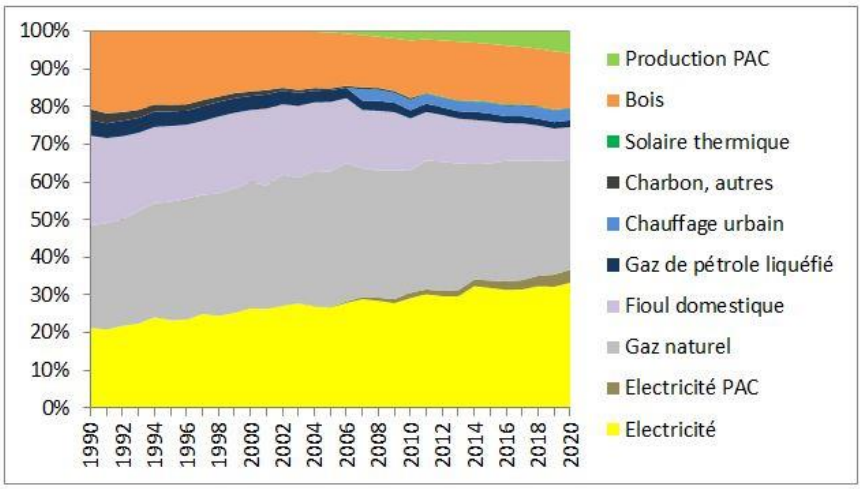


Figure 7: Évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel suivant le type d'énergie
Source : (*Chiffres clés de l'énergie*, 2022)

Depuis 1982 et jusqu'à aujourd'hui, le chauffage demeure le poste le plus consommateur d'énergie dans les bâtiments résidentiels français représentant 63 % de la consommation d'énergie finale en 2020. Sa consommation a néanmoins baissé de 13 % entre 1982 et 2020 (**Figure 8**). Cette diminution est le résultat des réglementations thermiques successives.

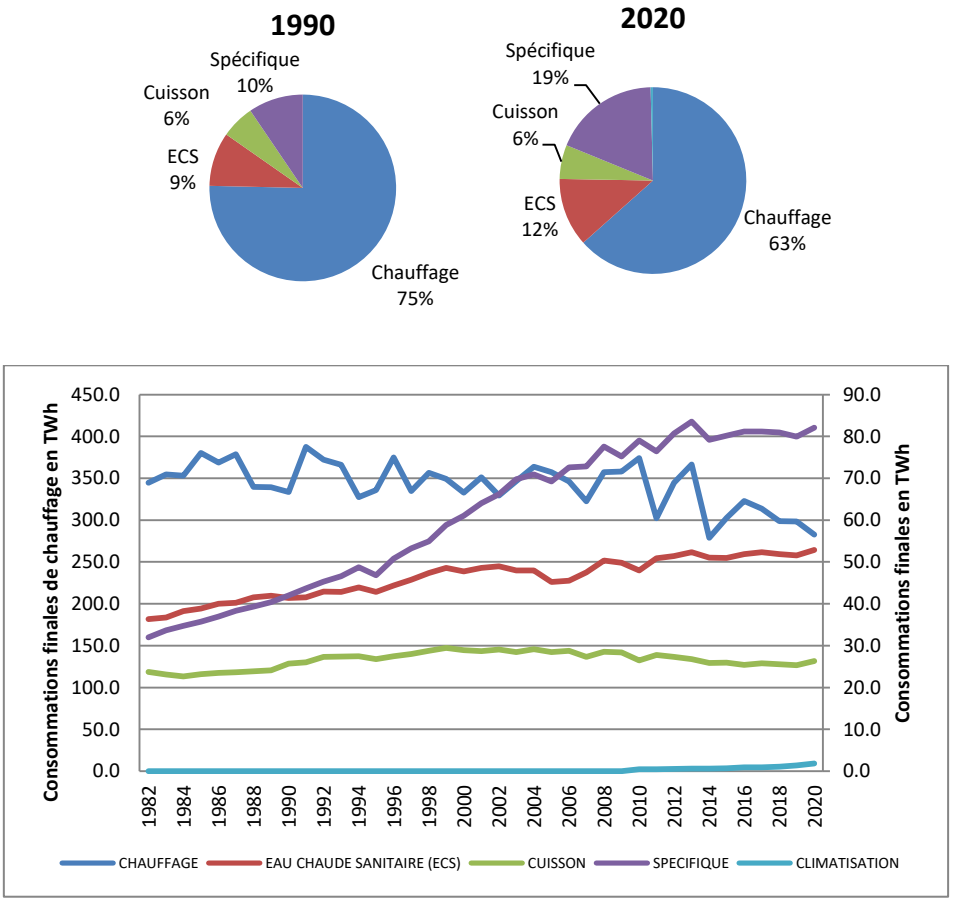


Figure 8 : Évolution des consommations finales d'énergie dans le résidentiel par poste entre 1982 et 2020
Échelle de gauche : Chauffage ; Échelle de droite : Autres postes
Sources : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/

En 1973, la principale énergie utilisée pour le chauffage était le fioul qui chauffait quasiment la moitié des logements. Les logements chauffés au gaz naturel représentaient un peu moins de 10 % et celles à l'électricité seulement 6 % (Dupont, 2018). En 2020, le gaz naturel est devenu la première source pour les équipements de chauffage (41 %) et l'électricité s'est positionnée en deuxième place à hauteur de 30 %. Les pompes à chaleur représentent alors 7 % des systèmes de chauffage dans les logements. Elles ont l'avantage de réduire les consommations d'énergie de ce poste de consommation. En effet, bien qu'elle soit la deuxième source pour les équipements de chauffage dans les logements, l'électricité représente seulement 16 % des consommations finales du chauffage dans le résidentiel au même niveau que le fioul en 2020. 50 % des consommations de chauffage ont comme source le gaz naturel (**Figure 9**).

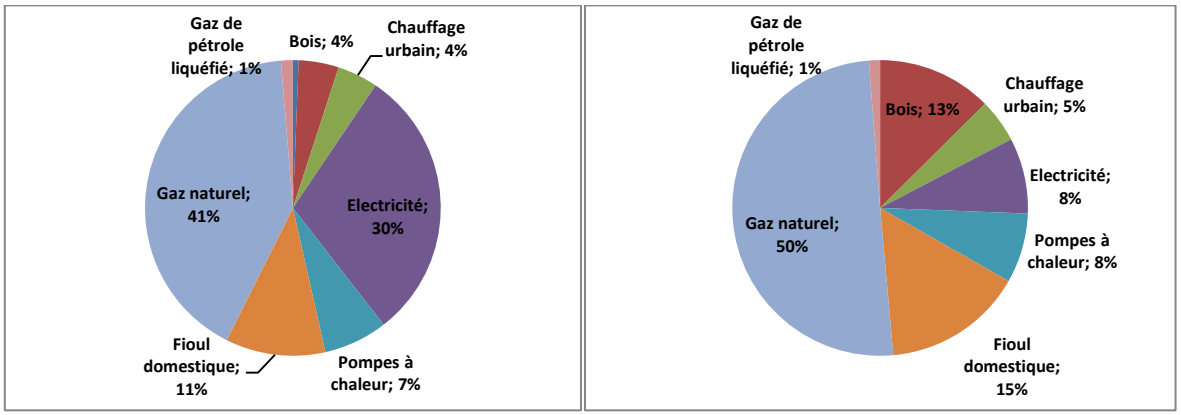


Figure 9: (A gauche) Énergies principales de chauffage dans les logements et (A droite) leurs consommations en 2020
Source : Ceren - France métropolitaine - ensemble des résidences principales

Le deuxième poste de consommation est l'électricité spécifique[4] et ce depuis 1991. Elle a connu une évolution remarquable en ce qui concerne sa consommation qui a presque doublé entre 1982 (32 TWh) et 2019 (73,1 TWh). La distribution des usages énergétiques dans les bâtiments résidentiels est susceptible d'évoluer vers des consommations d'électricité spécifique importantes qui dépassent celles du chauffage. Ceci se confirme avec l'augmentation du nombre de bâtiments passifs et à énergie positive où le poste thermique est très réduit mais où plus d'appareils électriques continuent à être utilisés (Charlot-Valdieu and Outrequin, 2017).

L'eau chaude sanitaire est un poste de consommation qu'il est intéressant d'investiguer. Sa consommation a elle aussi connu une augmentation de 34 % de 1982 à 2019 et l'électricité représente 48 % de la consommation totale de ce poste. La part du fioul est passée de 24 % en 1990 à 10 % en 2020 et le gaz naturel représente toujours une part de 31 % des consommations totale d'énergie de ce poste depuis 1990. Si une réduction des consommations de chauffage peut être atteinte grâce à une amélioration de l'enveloppe du bâtiment et de plus en plus de recours aux pompes à chaleur, les besoins toujours présents en eau chaude sanitaire nécessitent que des mesures soient mises en place afin d'éviter davantage d'augmentation dans les consommations énergétiques liées à ce poste.

[4] L'électricité spécifique correspond à l'électricité utilisée pour les services qui ne peuvent être rendus que par l'électricité. L'électricité consommée pour le chauffage, la production d'eau chaude ou la cuisson n'est pas de l'électricité spécifique, puisque d'autres énergies (gaz, solaire, pétrole) peuvent être employées.

Finalement, le poste de climatisation[5] dont l'énergie principale est l'électricité, est caractérisé par une faible consommation mais un usage de plus en plus important. En 2016, les ménages équipés de systèmes de climatisation représentaient 11 % seulement. En 2020, ce pourcentage a atteint 26 %. Les conditions météorologiques dues au changement climatique ont fortement impacté cette évolution notamment la multiplication des épisodes caniculaires (*ADEME*, 2021). Deux tiers des systèmes de climatisation sont des pompes à chaleur et un tiers sont des systèmes mobiles. L'emploi de ces technologies explique les consommations faibles de ce poste (Binet and Grignon-Massé, 2020).

Cette évolution dans les types d'énergies consommées et les postes de consommations montrent comment les réglementations thermiques et les travaux d'isolation ont permis de réduire les besoins de chauffage dans les bâtiments, et donc les consommations énergétiques qui leur sont liées. Le recours aux pompes à chaleur permet une réduction de consommation d'énergie. Cette évolution permet aussi de voir apparaitre de nouveaux postes de consommation qui peuvent être à leur tour ciblés afin de réduire les consommations énergétiques des bâtiments résidentiels.

3.2 *Bâtiments tertiaires*

La consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire était de 237,5 TWh en 2019 (209,3 TWh en 2020 suite à la crise sanitaire[6]). L'électricité représente presque la moitié de cette consommation, suivie par le gaz naturel (31 %). La part du fioul décroit sur toute la période entre 2013 et 2020 pour atteindre 10 % en 2020. La part des énergies renouvelables représente 4 % du total des consommations en 2020 au même niveau que les réseaux de chaleur (**Figure 10**).

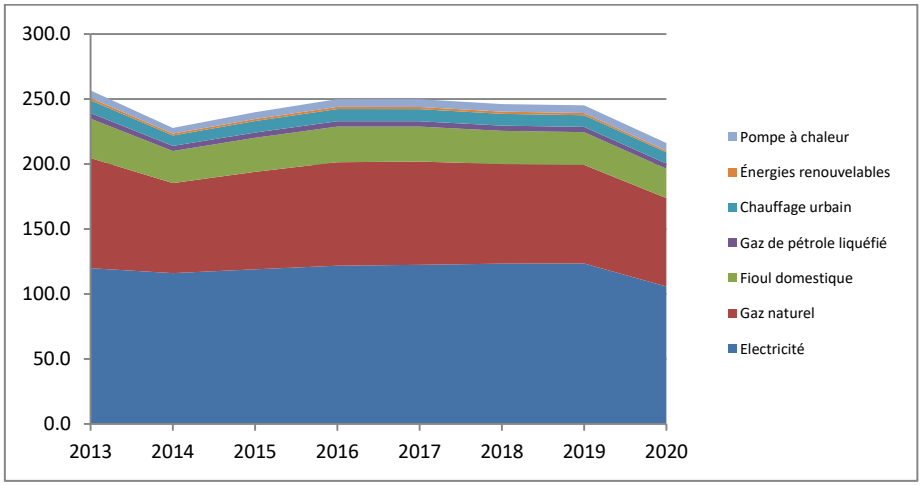


Figure 10 : Consommations finales d'énergie dans le tertiaire entre 2013 et 2020 par type d'énergie
Source : CEREN

Dans le tertiaire également, le chauffage est le poste le plus consommateur d'énergie (42 %). La part de l'électricité spécifique est de 27 % et celle de l'ECS est de 11 %. À la différence du secteur résidentiel, la climatisation dans le tertiaire représente 10 % du total des consommations

[5] Par abus de langage, nous faisons référence en utilisant le mot « climatisation » aux systèmes de refroidissement. Par définition, la climatisation regroupe les systèmes de chauffage et de refroidissement permettant de changer la température d'un local.

[6] Les consommations faibles notées en 2014 sont le résultat d'un hiver avec des températures plus élevées comparées aux autres années, ce qui a induit moins de consommations d'énergie de chauffage.

d'énergie. Les consommations du chauffage pèsent plus lourd dans le cas des bâtiments résidentiels comparés aux bâtiments tertiaires (**Figure 11**).

Suivant la même tendance que pour le résidentiel, les consommations finales du poste de chauffage ont connu une diminution de 14,4 % entre 2013 et 2019 (26 % en 2020). En 2020, 46 % des surfaces sont chauffées par le gaz naturel. L'électricité, avec 29 %, arrive en deuxième position. 20 % de cette consommation provient des pompes à chaleur. Cette distribution est cependant différente dans le cas des constructions neuves où l'électricité chauffe 49 % de la surface totale avec une contribution de 34 % des pompes à chaleur. Le gaz naturel représente la part la plus importante des consommations finales de chauffage (52 % en 2020), suivi par le fioul (17 %) et l'électricité (15 %). Malgré leur part importante comme source d'énergie dans le tertiaire, la consommation des pompes à chaleur ne dépasse pas les 6 %. La tendance pourrait donc se tourner vers un plus grand usage des pompes à chaleur dans les bâtiments tertiaires afin de réduire les consommations d'énergie de ce poste.

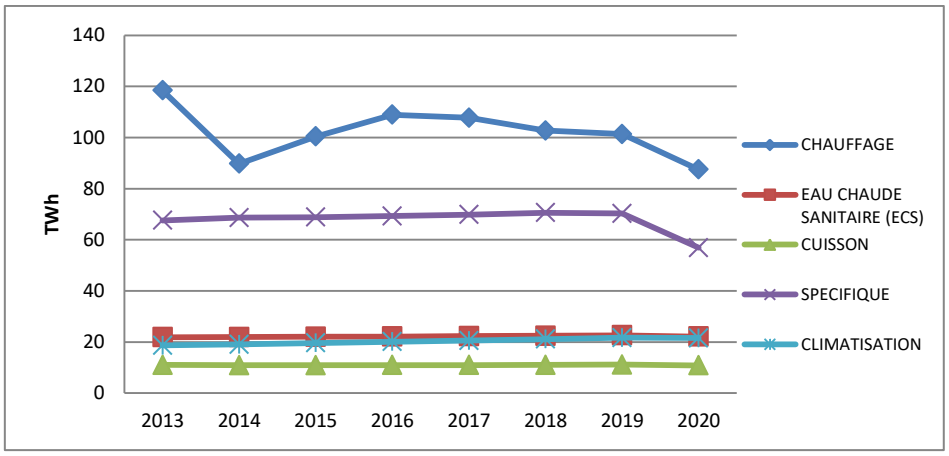


Figure 11: Évolution des consommations d'énergie dans le tertiaire par poste entre 2013 et 2020
Source : CEREN

La consommation d'électricité spécifique constitue le deuxième poste de consommation dans le tertiaire. Sa part se rapproche de celle du chauffage et ne cesse de croitre compte tenu des activités hébergées dans les bâtiments de ce secteur et en particulier les bâtiments bureau. Cette consommation s'est considérablement réduite en 2020 suite à la crise sanitaire et aux conditions de télétravail. La part des équipements informatiques dans la consommation d'électricité d'une entreprise de bureau est en effet de 21 % (ADEME, 2020). L'éclairage représente aussi un poste de consommation important dans le cas de bâtiments bureaux. S'agissant des bâtiments à haute performance énergétique pour qui les postes d'éclairage et Chauffage Ventilation Climatisation (CVC) ont une faible consommation, la consommation des appareils électriques a encore plus d'impact (Gandhi and Brager, 2016). L'électricité spécifique dans les bâtiments bureaux dispose donc d'un important potentiel de réduction d'énergie.

Le poste de climatisation dans le tertiaire connait lui aussi une continuelle croissance. Alors que la part de la climatisation ne dépassait pas 10 % il y a vingt ans, les surfaces climatisées ne cessent d'augmenter aujourd'hui. La seule source de climatisation est l'électricité. En 2020, 13,6 % du total des surfaces du tertiaire sont refroidies par des pompes à chaleur. En ce qui concerne les constructions neuves, les PAC permettent de refroidir 39 % du total des surfaces. Néanmoins, le taux de climatisation dans les bâtiments tertiaires varie d'une activité à une autre. Ainsi, alors que seulement 7 % des surfaces des bâtiments d'enseignement sont climatisés, ce taux monte à 64 % pour les bureaux (ADEME, CODA STRATEGIES, 2021).

Concernant l'ECS dont la consommation est restée presque stable sur toute la période entre 2013 et 2020, les besoins varient suivant les activités du bâtiment et de ses occupants. Les bâtiments de bureaux par exemple ont des consommations relativement faibles comparées à d'autres établissements tertiaires tels que les hôtels (COSTIC, 2020).

Nous constatons d'après ce qui précède que les besoins quotidiens de chaque poste conduisent à des consommations d'énergies importantes dans le tertiaire et dans le résidentiel. En outre, les énergies fossiles représentent une part importante de ces consommations finales. Ces constatations nous amènent, dans ce qui suit, à lister les solutions d'efficacité énergétique permettant de réduire les besoins de chaque poste et d'améliorer la performance énergétique de ces équipements.

4 *La performance énergétique des bâtiments*

4.1 *Cadre réglementaire*

En France, l'évolution du cadre réglementaire a été accompagnée par la création de labels et la définition de nouveaux types de bâtiments permettant de répondre à des exigences réglementaires (**Figure 12**).

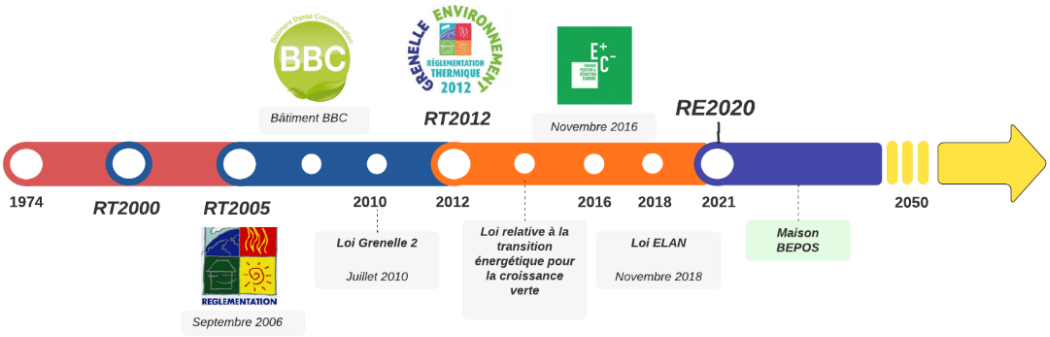


Figure 12: Évolution réglementaire en France depuis 1974

Ces évolutions de réglementation ont donné lieu à l'avènement de types de bâtiments selon leur performance énergétique. Nous présentons ci-dessous ces types de bâtiments.

- **Les bâtiments à basse consommation (BBC)** : dans le cas de ces bâtiments, le niveau de performance énergétique est supérieur au niveau standard et se situe dans une tranche inférieure à 50 kWhEP/m^2/an[7] (multiplié par le coefficient de correction climatique selon les régions[8]) ;
- **Les bâtiments passifs** : il s'agit de bâtiments pour lesquels la consommation de chauffage est très faible voire nulle. Le bâtiment bien isolé est capable de remplir les

[7] kWhEP/m2/an : Énergie exprimée en énergie primaire (EP) par unité de surface et pour une année. Les postes concernés varient suivant la réglementation.

[8] La consommation d'énergie dépend de la température extérieure. Chaque zone climatique possède un coefficient de correction climatique permettant de corriger les consommations sur la base des données climatiques.

besoins de chauffage grâce aux apports internes et au maintien des températures intérieures ;

- **Les bâtiments à zéro énergie** : c'est un bâtiment dont les consommations sont très faibles et qui sont compensées par une production d'énergie renouvelable propre au bâtiment menant à un besoin quasi nul en énergie ;
- **Les bâtiments à énergie positive (BEPOS)** : à l'instar des bâtiments à zéro énergie, ils produisent assez d'énergie pour couvrir leurs besoins énergétiques mais aussi pour en injecter dans le réseau. Leur bilan énergétique annuel est caractérisé par plus de production que de consommation. Les consommations sont faibles grâce à l'architecture et le type d'équipements utilisés ;
- **Les bâtiments autonomes** : ce sont des bâtiments qui ne sont reliés à aucun réseau électrique ou de gaz et qui couvrent de façon autonome leurs besoins énergétiques grâce à des consommations réduites et à la production d'énergie renouvelable intégrée aux systèmes du bâtiment.

La première réglementation thermique (RT) vit le jour en 1974 suite aux chocs pétroliers. Depuis, plusieurs réglementations thermiques (RT) se sont succédé : RT1982, RT1988, RT2000, RT2005, RT2012, jusqu'à la RE2020. Chaque nouvelle réglementation se veut plus exigeante que la précédente et vise davantage d'économies d'énergie dans les bâtiments (**Tableau 1**).

Réglementation thermique	Objectifs de consommation d'énergie primaire
RT1974	- 225 kWh/m^2/an - Bâtiments résidentiels neufs - Isolation
RT1982	- 170 kWh/m^2/an - Bâtiments résidentiels neufs
RT1988	- 170 kWh/m^2/an
RT2000	- 130 kWh/m^2/an - Exigences de performance globale - Confort d'été
RT2005	- 90 kWh/m^2/an - Labels de performance énergétique
RT2012	- 50 kWh/m^2/an - Tous les postes de consommation - **Bâtiment BBC**
RE2020	- 0 kWh/m^2/an - **Bâtiment BEPOS**

Tableau 1 : Chronologie des objectifs de performance énergétique par réglementation thermique

Le chauffage est au cœur de toutes les réglementations antérieures à celle de 2012 en raison de la part majeure qu'il représente dans les consommations d'énergie. Les mesures adoptées visaient alors essentiellement l'optimisation de l'isolation thermique, la réduction des ponts thermiques et la maximisation des apports thermiques passifs à travers une architecture dédiée, une bonne orientation et un bon choix de matériaux de construction. Une vision plus intégrée considérant d'autres postes de consommations a été adoptée avec la RT2012 (**Tableau 2**) dont l'application a commencé en France en 2011 dans toutes les nouvelles constructions tertiaires neuves et en 2013 dans les bâtiments résidentiels.

Poste de consommation	**Consommations d'énergie primaire**
Chauffage et climatisation	15 kWh/m^2/an
Eau chaude sanitaire	25 kWh/m^2/an

Éclairage	5 kWh/m^2/an
Équipements auxiliaires	5 kWh/m^2/an
Total	**50 kWh/m^2/an**

Tableau 2 : Exigences d'efficacité énergétique par poste dans la RT2012

Avec la publication de la loi Elan (Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique) en 2018, le Code de la construction et de l'habitation a connu l'introduction d'une nouvelle obligation qui concerne la réduction des consommations énergétiques des bâtiments tertiaires français. Le décret tertiaire, entré en vigueur en 2019, concerne les bâtiments tertiaires d'une surface supérieure ou égale à 1 000 m^2. Son objectif principal est de réduire la consommation finale d'énergie dans les bâtiments concernés à -40 % en 2030, -50 % en 2040, et -60 % en 2050 par rapport à l'année de référence 2010.

Les leviers d'actions du décret tertiaire sont :

- Installation d'équipements performants et de dispositifs de gestion et de contrôle qui permettent de réduire les consommations d'énergie et d'éviter le gaspillage ;
- À court terme, agir sur les occupants en mettant en place une communication et une sensibilisation aux éco gestes ;
- À long terme, des travaux de rénovations énergétiques : isolation, systèmes de chauffage, autres… ;
- Intégration des énergies renouvelables.

En 2020, la France passe d'une réglementation thermique à une réglementation environnementale, la RE2020 introduite par la LTECV et la loi Elan, dans l'objectif de poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et du confort des constructions, tout en diminuant leur impact carbone. Ses exigences sont les suivantes :

- Un seuil de dépenses énergétiques de 0 kWh/m^2/an au lieu de 50 kWh/m^2/an ;
- La prise en compte des appareils ménagers et électroménagers ;
- La suppression totale du gaspillage énergétique grâce à une gestion intelligente des consommations ;
- La prise en compte de la production d'énergie et de l'empreinte environnementale et pas uniquement de l'isolation thermique. Elle précisera le niveau de gaz à effet de serre – et sa méthode de calcul – sur le cycle de construction, usage et démolition des bâtiments (LTECV, 2015b).

4.2 *Améliorer la performance énergétique des bâtiments*

Bien que le terme « efficacité énergétique » ne fût pas autant utilisé avant le 20ème siècle, les solutions et moyens pour améliorer les conditions de vie dans les bâtiments datent de l'Antiquité. Les différentes générations qui se sont succédé ont créé et transmis des solutions permettant d'exploiter l'environnement extérieur et développer les systèmes énergétiques du bâtiment pour des raisons de confort mais aussi pour préserver les ressources (Ionescu et al., 2015).

Ces techniques ont évolué pour englober des solutions technologiques développées que nous connaissons de nos jours. Les solutions d'efficacité énergétique relatives au bâtiment peuvent être classées en deux grands types (Deng et al., 2014) :

- **Les solutions passives** liées à l'isolation, l'architecture, l'orientation et autres volets sont maintenant intégrées dans la plupart des bâtiments neufs et sont prises en compte lors de la phase de conception.
- **Les solutions actives** (gestion de l'énergie, domotique, GTB) prennent de plus en plus de place dans les nouveaux bâtiments à basse consommation. En plus des solutions d'efficacité énergétique visant la réduction de la demande en énergie, l'intégration de solutions d'énergies renouvelables et de systèmes de gestion et de contrôle de l'énergie représentent aussi des solutions d'efficacité énergétique (Belussi et al., 2019).

(Mostafavi et al., 2021) présentent une revue de littérature des solutions d'efficacité énergétique intégrées dans la phase de conception et celles qui concernent les travaux de rénovation. Dans ce qui suit, nous résumons de façon séparée ces solutions :

4.2.1 *Dans les bâtiments neufs*

Les solutions d'efficacité énergétique étudiées permettent de réduire les besoins et consommations des différents usages du bâtiment et d'assurer le confort des occupants suivant les conditions géographiques du bâtiment (Friess and Rakhshan, 2017). Nous énumérons et résumons ces solutions dans ce qui suit :

4.2.1.1 ***Réduction des besoins de chauffage et de climatisation***

De nombreux facteurs impactent les besoins thermiques du bâtiment tels que la composition de l'enveloppe, la forme du bâtiment ou encore la taille des fenêtres (Bano and Sehgal, 2018).

L'enveloppe du bâtiment est un élément clé permettant de réduire les consommations de chauffage et d'assurer le confort des occupants (Causone et al., 2017). Elle est définie comme l'ensemble des « éléments intégrés d'un bâtiment qui séparent son intérieur de son environnement extérieur » (Directive 2010/31/UE, 2010). Elle regroupe l'ensemble des murs, des planchers bas, tous les types de toitures et de parois qu'elles soient opaques ou vitrées (*Arrêté relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants.*, 2007).

La résistance thermique, qui est l'inverse du coefficient de transmission d'une paroi, est un facteur clé permettant de déterminer si le bâtiment est capable de s'isoler des intempéries et de garder une température de confort malgré les conditions extérieures (Ascione et al., 2019). Un niveau bien défini d'isolation des murs et des menuiseries est indispensable pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Sur la période entre 1973 et 2007, une partie importante des économies d'énergie réalisées sur les consommations de chauffage sont le résultat du progrès fait dans l'isolation des bâtiments nouvellement construits (Dupont, 2018). Des techniques comme les murs à double paroi sont utilisées (Omrany et al., 2016). Il est important de choisir une enveloppe adaptée au climat avec des matériaux adaptés mais aussi le développement de nouveaux types de matériaux (Mi et al., 2020). Il est important de choisir une enveloppe adaptée au climat avec des matériaux convenables (Arif Kamal and Bano, 2016). Certains travaux étudient même l'efficacité des isolations sur le long terme en prenant en considération des variations de températures dues au changement climatique (Hosseini et al., 2018). (Aditya et al., 2017) dressent une liste des solutions d'isolation et (da Cunha and de Aguiar, 2020) présentent l'impact positif de l'utilisation des matériaux à changement de phase sur la réduction des consommations d'énergie dans les bâtiments.

L'architecture et la forme du bâtiment ont une influence sur la quantité d'énergie solaire qu'il peut recevoir et impactent donc les besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage (Mingfang, 2002). Des études préalables lors de la phase de conception permettent d'améliorer

la performance énergétique des bâtiments et ainsi éviter les surconsommations (Kazanasmaz et al., 2014) notamment pour ce qui est de la géométrie grâce à l'étude de l'environnement et de son impact sur l'ouvrage à travers les façades et leur forme par rapport au soleil par exemple (Ghosh and Neogi, 2018). Des solutions passives permettent d'exploiter les apports solaires et de maintenir au maximum la chaleur à l'intérieur du bâtiment comme par exemple le mur trombe[9] (Jovanovic et al., 2017). Le ratio mur-à-fenêtre est aussi un facteur qui peut être exploité (Kim et al., 2016). Les travaux de (Marino et al., 2017 ; Murano et al., 2018) ont montré des réductions allant de 10 % à 30 % en agissant sur les dimensions des fenêtres et leur facteur solaire. Le ratio mur-à-fenêtre doit être choisi suivant un compromis qui permet moins de surchauffe générée par les apports solaires (surtout dans les régions chaudes) et assure en même temps les besoins en lumière naturelle afin de réduire les consommations d'éclairage artificielle (Pathirana et al., 2019).

L'orientation du bâtiment joue un rôle important dans le contrôle des besoins des systèmes CVC. À travers l'étude de plusieurs cas d'orientation du même bâtiment, (Abanda and Byers, 2016) prouvent que l'orientation du bâtiment peut contribuer à des économies d'énergie considérables tout en long de son cycle de vie et (Pacheco et al., 2012) indiquent qu'une réduction de presque 54 % des consommations d'énergie peut même être atteinte en agissant sur l'orientation du bâtiment.

Concernant les ***protections solaires et les systèmes d'occultation,*** (Kirimtat et al., 2016) démontrent l'importance de leur intégration des protections solaires dès la phase de conception en tenant compte du climat et de l'orientation du bâtiment. (Liu et al., 2019) quant à eux recherchent la configuration optimale des panneaux occultant sur les murs et fenêtres des bâtiments pour assurer un maximum de réduction des besoins de refroidissement. Des économies allant jusqu'à 8 % sont obtenues. (Valladares-Rendón et al., 2017) étudient de façon détaillée les protections solaires et leur impact sur les réduction des besoins CVC .

4.2.1.2 ***Réduction des besoins d'éclairage***

Les consommations liées à l'usage de l'éclairage peuvent être réduites en exploitant au maximum la lumière naturelle à la conception, grâce à la géométrie (Ghosh and Neogi, 2018), le vitrage et les systèmes d'occultation (Kunwar et al., 2020). Un compromis doit être trouvé entre le facteur solaire et la transmission lumineuse afin de réduire au maximum les besoins d'éclairage tout en maintenant le confort thermique des occupants (Alhagla et al., 2019). En effet, le contrôle du facteur solaire a une influence sur la transmission lumineuse. Des solutions comme le double vitrage clair et réfléchissant, le double vitrage clair et absorbant, le vitrage à propriétés variables, le vitrage sélectif sont alors utilisées. (Hee et al., 2015; Wang and Shi, 2017). (Krarti, 2022) proposent un système intelligent de gestion de vitrage des fenêtres suivant les conditions de température et les besoins des occupants. Le choix de la technologie LED est aussi important vu que cette dernière représente le système d'éclairage le plus performant actuellement au regard d'autres types de lampes. Les lampes LED possèdent un flux lumineux 6 fois plus important que les lampes à incandescence et une émission beaucoup plus faible de chaleur ce qui est favorable pour maintenir le confort thermique (Enongene et al., 2017).

4.2.1.3 ***Ventilation et refroidissements passifs***

[9] Le mur Trombe se compose d'un mur en béton et d'un vitrage et permet de réchauffer le bâtiment à travers l'énergie solaire emprisonnée à l'intérieur du mur et introduite par ventilation à l'intérieur du bâtiment

Les systèmes de refroidissement passifs tels que les solutions de ventilation naturelle (Omrani et al., 2017), la ventilation nocturne, ou le refroidissement par inertie de la terre ont aussi été traités par la littérature. D'après (Weerasuriya et al., 2019), des réductions d'énergies de 45 % peuvent être atteintes avec les techniques de ventilation naturelle dans les bâtiments de grande hauteur. D'autres solutions dites de protection[10], de modulation[11] et de dissipation[12] sont présentées dans les travaux de (Bhamare et al., 2019) qui étudient l'impact du refroidissement passif sur la réduction des consommations d'énergie et sur le maintien des températures de confort.

En dehors de ces solutions dites passives, d'autres solutions doivent être envisagées en phase de conception afin de garantir une bonne performance du bâtiment.

4.2.1.4 ***Utilisation d'équipements performants***

Des solutions combinant à la fois des systèmes performants et des solutions passives sont de plus en plus intégrées dans les bâtiments comme dans le cas des conceptions avec ventilation naturelle et système de ventilation double flux. L'utilisation d'équipements électriques performants que ce soit dans le résidentiel (réfrigérateur, lave-linge et autres) ou dans le cas du tertiaire (équipements bureautiques, etc.) contribue à des réductions importantes de la consommation de l'énergie électrique (Mo and Zhao, 2021). L'installation de lampes performantes représente avec les thermostats, l'isolation et l'usage d'énergie renouvelables l'un des facteurs les plus impactant sur l'efficacité énergétique des ménages étudiés dans les travaux de (Kavousian et al., 2015).
Il faut cependant tenir compte lors de l'étude des réductions de consommations d'énergie suite à l'usage d'équipements performants de l'effet rebond13 qui peut engendrer plus de consommations d'énergie Jin, 2019, Belaïd et al., 2020).

4.2.1.5 ***La production d'énergies renouvelables***

Les sources d'énergie renouvelables utilisées dans le bâtiment peuvent être intégrées au bâtiment et permettent de produire l'énergie nécessaire qui est directement acheminée vers tous les systèmes du bâtiment. Le bâtiment peut aussi être alimenté par des sources d'énergie se trouvant à l'extérieur et aux alentours du bâtiment. Ces sources permettent une mutualisation de la production pour alimenter plusieurs autres bâtiments à la fois (Harkouss et al., 2018) .

Toutes les sources d'énergie renouvelables de proximité (hydraulique, l'éolien, solaire ; géothermie ou biomasse) peuvent être utilisées pour produire de l'énergie électrique acheminée jusqu'aux bâtiments d'un quartier (Reddick et al., 2020, Ahmed et al., 2022).

Concernant les systèmes intégrés aux bâtiments, nous distinguons les systèmes suivants :

- Les pompes à chaleur : géothermiques, air-air ou air-eau (Song et al., 2019) ;
- Les panneaux solaires et les panneaux photovoltaïques (Eicker et al., 2015) ;
- Le stockage de l'énergie (Tronchin et al., 2018).

---

[10] Solutions permettant de protéger le bâtiment des apports de chaleur solaires.
[11] Solutions permettant de stocker la chaleur captée par le bâtiment et de la libérer ultérieurement.
[12] Solutions basées sur l'évacuation de l'excès de chaleur dans des puits de chaleurs environnementaux (eau, air, sol)
[13] Dans le contexte des consommations d'énergie dans le bâtiment, l'effet rebond se traduit par des surconsommations à la suite de l'application de solutions d'efficacité énergétique visant la réduction de consommations d'énergie, en raison de l'adaptation des comportements, ce qui risque d'annuler ou de réduire l'impact de ces solutions.

- Les solutions de contrôle et de gestion

Un autre volet de solutions concerne les technologies de contrôle et de mesure des consommations des systèmes énergétiques du bâtiment (Chen et al., 2020). Cela consiste en un suivi de l'usage de l'énergie et la mise en place des stratégies visant la réduction de la demande afin d'éviter des consommations inutiles. Ces systèmes peuvent mener à des réductions importantes des consommations en se basant sur l'occupation des bâtiments et des calendriers de gestion des systèmes (Aste et al., 2017).

Les systèmes de gestion d'éclairage par exemple permettent de minimiser la consommation d'énergie électrique et maximiser le confort visuel. On peut distinguer différentes solutions :

- Gestion en fonction de la présence ;
- Gestion centralisée de l'éclairage ;
- Gestion en fonction de l'apport en éclairage naturel ;
- Gestion en fonction d'un horaire ;
- Zonage des commandes.

Au niveau de la consommation totale du bâtiment, beaucoup d'auteurs soulignent l'importance de doter un bâtiment d'un système de gestion de l'énergie. Au niveau réglementaire, l'Union européenne encourage la mise en place de systèmes de régulation soit en Gestion Technique Centralisée (GTC) dans le cas d'un seul lot (comme l'éclairage par exemple) ou, dans le cas de plusieurs lots, la Gestion Technique du Bâtiment (GTB) (ABDELLATIF et al., 2020).
Les systèmes de GTB sont des systèmes informatiques capables d'acquérir les données provenant d'un grand nombre de capteurs installés dans le bâtiment et de contrôler les différents systèmes techniques de ce dernier ainsi que les différents équipements commandables. Le système se base sur des protocoles de communication spécifiques et des bus de terrain filaires[14] assurant la communication entre le système de gestion, les actionneurs et les différents capteurs afin de maintenir les performances des systèmes et des bâtiments dans le temps. La GTB permet en effet d'avoir les données sur l'état de fonctionnement et les informations techniques sur les systèmes du bâtiment équipé. Elle permet également un suivi des consommations des équipements et donc la possibilité d'une optimisation de ces consommations (Gaitan et al., 2022), ainsi que le maintien du confort des occupants (Ghadi et al., 2016).
On assiste actuellement à une démocratisation de l'intégration des systèmes GTB dans les bâtiments neufs mais aussi en rénovation. Sur le plan réglementaire, le décret n° 2020-887 du 20 juillet 2020, dit décret BACS (pour Building Automation & Control Systems), concerne les systèmes d'automatisation et de contrôle ainsi que la régulation automatique de la chaleur dans les bâtiments tertiaires neufs et existants dont la puissance des systèmes de chauffage et de climatisation dépasse 290 kW. Le décret s'appliquera à partir de 2025 et exige, impérativement pour le système GTB :

- Le suivi, l'enregistrement et l'analyse des données de production et de consommations qui concernent tous les systèmes et équipements du bâtiment.
- La comparaison des niveaux d'efficacité énergétique du bâtiment avec des valeurs de référence et l'ajustement des consommations suivant les besoins.
- Le suivi des alertes et dérives de consommation afin d'éviter les surconsommations et les coûts de maintenance[15]

[14] Ce sont des éléments câblés qui permettent de transporter les informations des systèmes techniques du bâtiment.

[15] Le site dédié au décret BACS : https://decret-bacs.fr/

La littérature atteste à la fois du rôle de la GTB dans la réduction des consommations d'énergie tout en maintenant le confort des occupants (De Paola et al., 2014 ; Anvari-Moghaddam et al., 2015, Lee and Cheng, 2016). Les travaux de (Chobanov and Bojkov, 2021) promettent des réductions de consommation allant de 30 à 85 % suivant le poste de consommation, et ce en intégrant un système GTB. Les travaux de recherche s'intéressent à exploiter les données GTB afin d'optimiser les consommations du bâtiment en tenant compte de l'occupation et de l'environnement (Džiugaitė-Tumėnienė et al., 2021 ; Parys et al., 2014). Ces travaux encouragent aussi à l'exploitation de ces données dans les simulations thermiques dynamiques[16] afin de mieux estimer les consommations énergétiques du bâtiment. En effet, la GTB permet l'accès à des informations liées à l'usage de l'énergie dans le bâtiment : consignes, calendriers, températures ; ce qui permet de mieux définir les paramètres d'entrée de la simulation thermique dynamique (Mustafaraj et al., 2014). Ces données sont aussi utilisées pour calibrer les modèles ou vérifier les résultats obtenus (Ahn et al., 2016).

Si dans les bâtiments neufs la possibilité d'introduire des solutions d'efficacité énergétique se fait au moment de la phase de conception du bâtiment, leur introduction en rénovation doit tenir compte de l'existant et de ses contraintes. Nous présentons dans ce qui suit les solutions de rénovation énergétique.

4.2.2 *Bâtiment en rénovation*

Dans le cas des travaux de rénovation, il s'agit de travailler sur l'existant en vue de l'améliorer, ce qui peut rajouter d'autres contraintes.
Différents travaux attestent de l'impact des travaux de rénovation sur la réduction des consommations d'énergie (Massimo et al., 2021), couplés avec l'intégration de systèmes de production d'énergies renouvelables (Moazzen et al., 2020).

Dans les travaux de rénovation, on retrouve majoritairement (Wan et al., 2022) :

- L'amélioration de l'isolation interne ou externe en tenant compte de l'existant (bâti comme équipement de chauffage) surtout dans le cas de bâtiments historiques (Tan et al., 2021). De plus en plus de technologies sont développées dans ce sens (Kamel and Memari, 2022) .
- L'intégration des pompes à chaleur (air, eau ou géothermie) couplées avec un système de panneaux photovoltaïques.
- L'intégration de systèmes automatisés pour la gestion des différents systèmes déjà existants (Marinakis, 2020). Les travaux de (Yahiaoui, 2018) par exemple, investiguent le rôle d'un système automatique de contrôle des stores dans les réductions des consommations inutiles d'éclairage artificiel.
  Les thermostats connectés, quant à eux, ont connu un grand développement ces dernières années permettant de piloter les systèmes à distance depuis un ordinateur ou un smartphone (Wang et al., 2019 ; Haiad et al., 2004 ; Ponce et al., 2019).

Dans le résidentiel, les compteurs communicants ou « intelligents » sont de plus en plus utilisés dans le monde et en Europe (Kochański et al., 2020) où chaque pays membre est tenu de les déployer depuis le Troisième Paquet Énergie européen adopté en 2009 (European Comission, 2022 ; Benzi et al., 2011) (**Figure 13**).

[16] Simulation thermique du bâtiment permettant d'estimer sa consommation énergétique. Nous présentons plus en détail cet outil dans la partie 3 du Chapitre II.

En France, le compteur Linky a ainsi été intégré à partir de 2015 par les pouvoirs publics français. Il permet de transmettre les consommations électriques par courant porteur en ligne (CPL) et réseau mobile GPRS (FLÜRY-HÉRARD and DUFAY, 2017) et, aux consommateurs, d'avoir accès à leurs données de consommation d'électricité.

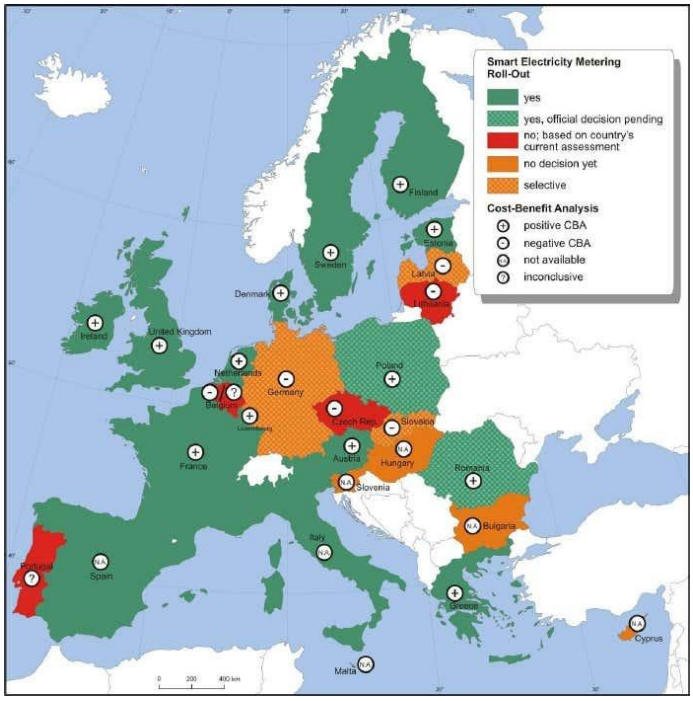


Figure 13: Déploiement des capteurs intelligents en Europe en 2020
Source : (Dexeus, 2014)

Pour résumer, les solutions d'efficacité énergétique varient selon qu'elles soient intégrées lors de la phase de conception en tenant compte des données géographiques et climatiques du bâtiment, ou intégrées aux travaux de rénovation nécessitant une prise en compte de l'existant.

Les travaux de rénovation présentent des avantages en termes de coût et de préservation du patrimoine historique (Marincioni et al., 2021). Ils représentent aussi un levier pour atteindre les objectifs de la transition énergétique (Remeikienė et al., 2021). Des études sont menées afin d'évaluer la rentabilité de l'investissement dans la rénovation ou dans la construction neuve, à travers des analyses de cycle de vie (ACV) orientées vers des objectifs de coût, de performance et de d'émissions CO2 (Hasik et al., 2019; Palacios-Munoz et al., 2019).
Cependant, un autre facteur doit être considéré qu'on soit dans un objectif de rénovation ou de nouvelle construction ; qui est le facteur humain. D'après (Ascione et al., 2020), un comportement de gaspillage d'énergie chez les occupants peut réduire l'impact positif de travaux de rénovation énergétique sur la réduction des consommations énergétique et retarder le retour sur investissement à une durée allant jusqu'à 20 ans. Les solutions orientées occupant sont donc à investiguer dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments.

4.2.3 *Les solutions orientées occupants*

Si les investissements lourds de rénovation de l'enveloppe et des systèmes énergétiques ainsi que les actions de réglages et d'optimisation des systèmes existants représentent des leviers importants à développer dans le cadre de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, un troisième levier est de plus en plus étudié par les chercheurs, les décideurs et les nouvelles réglementations (Rau et al., 2020) au niveau international et national. L'usage du

bâtiment étant fortement lié à ses occupants, la sensibilisation de ces derniers et la prise en compte de l'impact de leurs actions sur les systèmes énergétiques peut contribuer à des réductions d'énergie rapides (Harputlugil and de Wilde, 2021). Les premiers résultats du concours CUBE2020[17] attestent de ce constat (Dejous et al., 2021)(**Figure 14**).

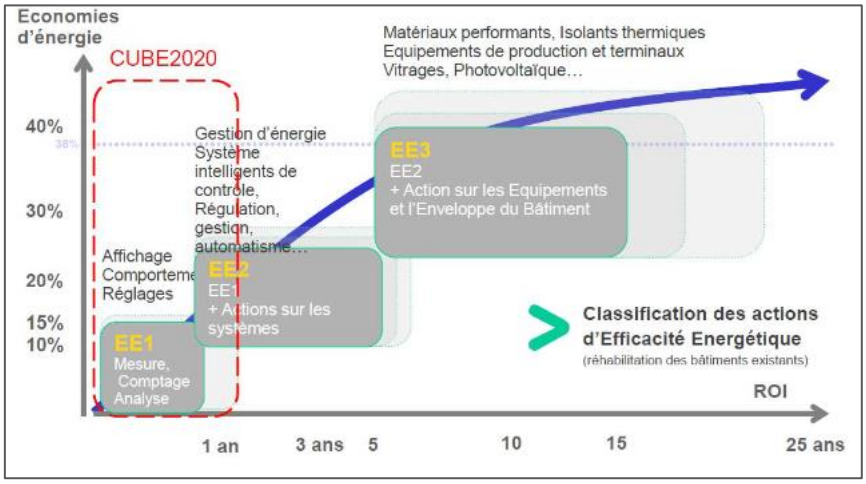


Figure 14 : Impact des actions entreprises dans le cadre du concours CUBE2020
***Source :* (Brisepierre and Garabuau-Moussaoui, 2020)**

Exclure le facteur humain du processus de prise de décision peut mener à moins de confort chez les occupants et plus de consommations d'énergie. D'après la revue de littérature de (Bavaresco et al., 2019), les travaux qui concernent le déploiement des solutions technologiques dans le domaine des comportements humains dans le bâtiment sont devenus de plus en plus nombreux à partir de 2015. Grâce à une analyse de sensibilité dans un bâtiment de grande hauteur, (Qin and Pan, 2020) prouvent que les mesures de réduction de consommations liées au comportement de l'occupant ont un fort impact comparées à d'autres mesures. Par exemple (Davis et al., 2020) expliquent comment le comportement des occupants qui consiste à laisser les fenêtres ouvertes pendant les journées chaudes a annulé l'impact positif des améliorations et rénovations au niveau du bâtiment.

Avec le développement des villes intelligentes, des réseaux intelligents, de la domotique, de l'Internet des objets et du Big Data, l'innovation technologique peut être perçue comme un outil incontournable pour réduire les consommations énergétiques, les gérer et garantir la performance énergétique en impliquant l'occupant et ses besoins dans le système de gestion (Farzaneh et al., 2021). Les solutions technologiques peuvent augmenter l'efficacité énergétique dans le bâtiment depuis sa phase de conception jusqu'à sa démolition. La phase de conception est importante parce que c'est l'étape au cours de laquelle plusieurs éléments du bâtiment sont figés, mais la phase d'exploitation représente aussi un vrai potentiel de préservation de l'énergie (Kovacic and Zoller, 2015).

Le déploiement des différents capteurs intelligents développés dans l'ère des objets connectés peut donner accès à des informations très importantes concernant les activités consommatrices d'énergie. Des informations qui ne peuvent pas être perçues par l'humain par manque de capacité physique (mesures des températures ou des consommations électriques par exemple)

[17] Le Concours Usages Bâtiment Efficace (CUBE) est une action d'intérêt général, organisée par l'IFPEB (Institut Français pour la performance du bâtiment), visant à aider les utilisateurs de bâtiments tertiaires ou d'habitations collectives à diminuer efficacement leurs consommations en agissant sur les leviers de l'usage, un meilleur pilotage et exploitation, en mettant en œuvre une compétition ludique entre les candidats.

ou parce qu'ils sont effectués durant les horaires de non-présence des occupants (luminaires non éteints au moment de quitter une salle). La contribution des objets connectés dans la mise en œuvre de l'efficacité énergétique dans les bâtiments passerait donc par l'exploitation de toutes les informations qu'ils peuvent procurer afin de mieux gérer les consommations énergétiques (Lopez-de-Armentia et al., 2014).

Avec l'avènement de l'Internet des objets (IdO), le potentiel de gestion d'énergie est de plus en plus accessible en termes de coût mais aussi de facilité d'usage, donnant lieu, grâce à l'inter-connectivité de tous les appareils, à de nouvelles perspectives de réduction de consommation, et à une réponse plus adaptée à la demande (Hannan et al., 2018).
L'IdO est un terme général qui fait référence à tous les appareils qui collectent et transmettent des données par le biais d'Internet. L'IdO intègre plusieurs technologies de communication, algorithmes et protocoles (Andrei et al., 2018). Il repose sur l'interconnexion de plusieurs capteurs, objets connectés et systèmes embarqués utilisés dans la vie de tous les jours (Iqbal et al., 2018), ce qui permet de relier les personnes, les institutions et les systèmes et de développer la gestion de l'énergie non seulement au sein du bâtiment mais aussi de la ville (Bavaresco et al., 2019). L'IdO est une solution qui a l'avantage d'être intégrée et exploitée dans différents types de domaines et environnements : résidentiels, commerciaux, industriels, etc. (Metallidou et al., 2020).

L'exploitation de ce potentiel technologique ainsi que la prise en considération du comportement des occupants dans la gestion des consommations d'énergie est donc nécessaire pour éviter le gaspillage d'énergie dans les bâtiments. Les solutions de gestion de l'énergie centrées sur l'occupant (Xie et al., 2020) permettent de sensibiliser les usagers tout en s'adaptant à leurs besoins (Himeur et al., 2021). Ils permettent de comprendre les besoins des occupants, gérer les systèmes afin de consommer ce qui est nécessaire seulement et maintenir le confort des occupants (Fotopoulou et al., 2017 ; De Paola et al., 2014 ; Hannan et al., 2018). Pour cela les données collectées sont traitées afin de comprendre le comportement des occupants et les différents profils de consommateurs d'énergie (Salim et al., 2020), pouvoir les prédire (Zhang et al., 2022a) et améliorer le pilotage des systèmes énergétiques du bâtiment (Pal et al., 2019).

5 *Conclusion du chapitre*

Au regard des enjeux environnementaux actuels, des engagements internationaux (les Conférences des Parties (COP) successives et l'Accord de Paris) et français (lois Grenelle, LTECV), une importance croissante est donnée au secteur du bâtiment dans une dynamique de changement visant l'exploitation du potentiel de réductions d'énergie possibles dans ce secteur. Dans ce chapitre, nous avons rappelé le contexte énergétique mondial et français et le positionnement du secteur du bâtiment dans les objectifs réglementaires français ainsi que ses consommations et les sources d'énergie qu'il utilise. Dans un contexte où l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est devenue une priorité, nous avons parcouru les solutions d'efficacité énergétiques telles que présentées dans la littérature. Ceci nous a permis de montrer que les flux énergétiques entre le bâtiment et son environnement sont de plus en plus maitrisées et que le facteur humain a un impact beaucoup plus significatif. Les facteurs clés influençant l'efficacité énergétique des bâtiments ont été principalement étudiés auparavant dans le cadre d'une conception optimale du bâtiment et un développement technologique de ses systèmes, mais aujourd'hui les solutions s'orientent également et de plus en plus vers la gestion du comportement des occupants. Les interventions sur le comportement des occupants et la prise en considération de leurs interactions avec les différents systèmes peuvent également représenter une solution afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments avec un faible

coût (IEA, 2021). Elles peuvent être appliquées autant aux bâtiments neufs qu'aux bâtiments existants. Fort de ce constat, et en vue d'étudier une approche visant la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment à travers ses occupants, il est important au préalable de mieux comprendre le comportement des occupants et de parcourir les travaux qui l'ont étudié en le mesurant, le modélisant et l'améliorant. Cela fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : Comportement énergétique dans le bâtiment

1 *Introduction*

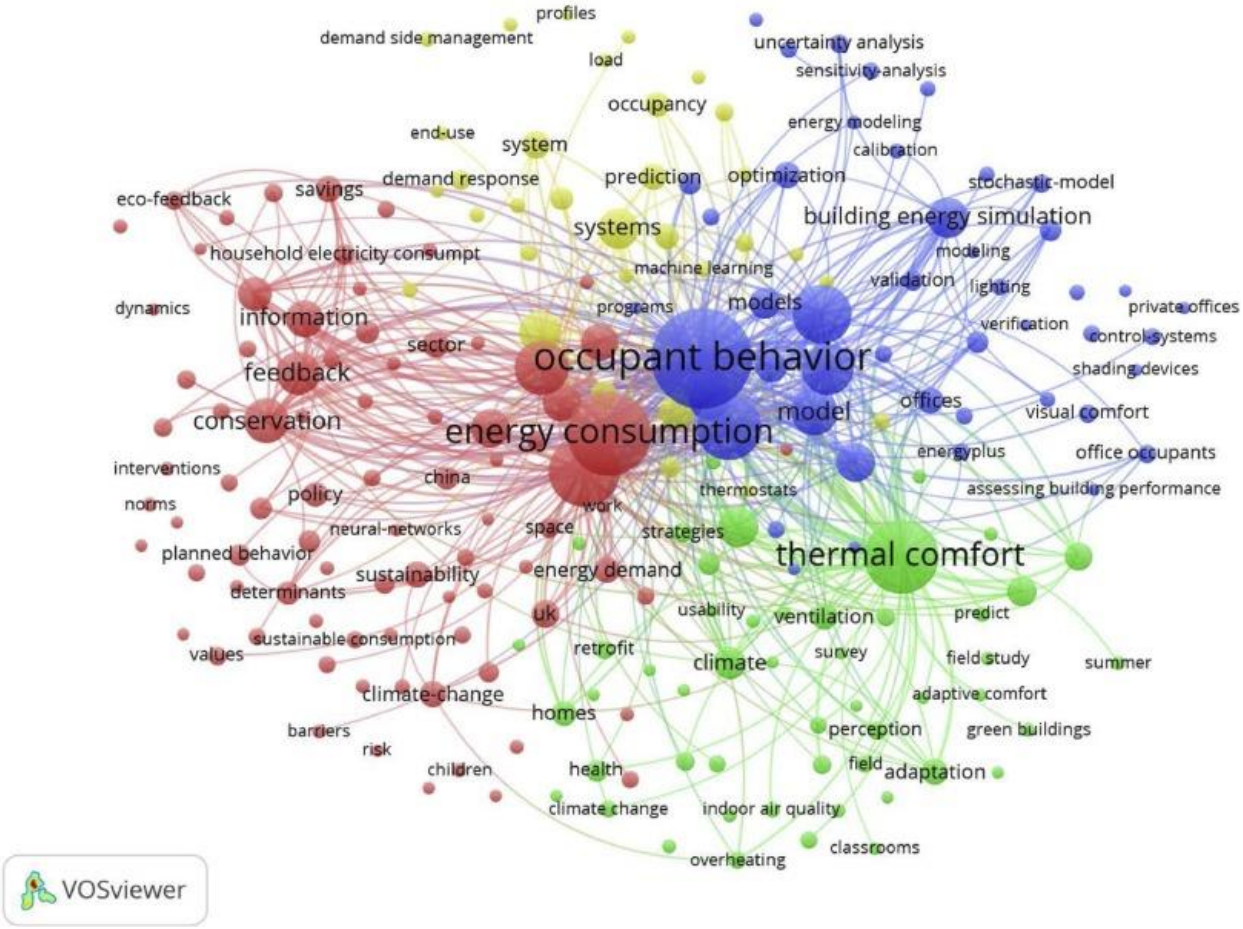
Il n'existe pas une définition consensuelle du « comportement de l'occupant » ou du « comportement énergétique des occupants » dans la littérature (Zhang et al., 2018). Si certains considèrent l'investissement dans des mesures d'efficacité énergétique telles que l'acquisition d'appareils performants ou l'installation d'un système de production d'énergie renouvelables comme faisant partie de cette définition (Ouyang and Hokao, 2009), d'autres restreignent le comportement des occupants aux activités consommatrices d'énergie réalisées lors de la période d'occupation (Sunikka-Blank and Galvin, 2012 ; Andersen et al., 2009). D'autres études encore intègrent dans cette définition les comportements qui permettent d'éviter des surconsommations d'énergie. (Sun and Hong, 2017), par exemple, définissent le comportement des occupants dans le bâtiment comme l'ensemble des interactions entre les usagers et les systèmes du bâtiment qui peuvent avoir un impact sur la performance du bâtiment. Quelles soient dictées par des préférences en termes de confort ou par des habitudes sociales, ces interactions ont un impact direct ou indirect sur les consommations énergétiques. L'impact indirect inclut par exemple la façon de se vêtir des occupants et leur interaction avec les ouvertures du bâtiment.

D'après l'Annexe 66 de l'Energy in Buildings and Communities Programme établie par l'Agence internationale de l'énergie (Yan and Hong, 2018), le comportement des occupants est défini comme un ensemble d'actions observables ou réactions des occupants aux stimuli externes ou internes, ou comme des actions ou des réactions entreprises par l'occupant afin de s'adapter aux conditions environnementales telles que la température, la qualité de l'air ou la quantité de soleil. À partir de cette définition, (S. Chen et al., 2015) établissent quant à eux trois niveaux de détails à considérer lors de la prise en compte du comportement des occupants dans les différents travaux de recherche en fonction des besoins de chaque étude :

- **Le niveau simple** où le comportement est essentiellement considéré à travers des calendriers de présence qui définissent les heures de présence pour des journées types. L'usage des appareils et des systèmes d'énergie est représenté lui aussi par des calendriers d'heures d'utilisation par journée type.
- **Le niveau intermédiaire** où le comportement est représenté par des calendriers de présence, des calendriers d'usage des appareils et des systèmes d'énergie avec en plus la définition de leurs consignes de fonctionnement. Dans ce niveau, les ouvertures et fermetures des fenêtres sont elles aussi définies mais à travers des calendriers seulement.
- **Le niveau complexe** où la description du comportement est plus complète précisant les calendriers d'usage avec les heures de début et de fin, le pourcentage de l'effet de l'action sur les systèmes (pourcentage d'ouverture des fenêtres par exemple), les puissances et consignes d'usage, et la prise en considération des facteurs d'environnement (températures par exemple) pour le contrôle des systèmes.

Le « comportement lié à l'énergie » représente l'ensemble des comportements des occupants liés à l'usage de l'énergie au sein d'un bâtiment. Il englobe l'ensemble des actions réalisées dans le bâtiment et qui conduisent à des consommations d'énergie (Bourgeois et al., 2017). Nous le qualifions dans ce qui suit de « comportement énergétique ».

L'analyse de la littérature autour du « comportement énergétique » met avant la multitude des disciplines (psychologie, sociologie, économie, ingénierie) qui se sont emparées et ont traité du comportement de l'occupant dans le bâtiment avec des courants et des approches différentes. En plus de la multidisciplinarité de cette thématique, on peut noter que certains champs sont de plus en plus prédominants par rapport à d'autres dans l'analyse des comportements énergétiques. Les travaux de (Zhang et al., 2018) montrent dans le cadre des études sur le comportement énergétique dans le bâtiment une dominance des mots clés liés à la consommation d'énergie et aux incitations pour conserver l'énergie, des mots clés liés au confort de l'occupant en lien avec les systèmes du bâtiment. Un autre volet est celui des simulations énergétiques du bâtiment, les travaux de modélisation d'optimisation et de prédiction (**Figure 15**)



Vert : Comprendre le comportement des occupants : Confort, Interaction avec le bâtiment
Rouge : Stratégies de réduction des consommations basées sur le comportement
Bleu : Modélisation quantitative : simulation, optimisation, modélisation énergétique
Jaune : Méthode de recherche et collecte de données énergétiques : Collecte de données, Gestion de l'énergie, Thermostats

Figure 15: Schéma clustering et réseau entre les mots clés
Source : (Zhang et al., 2018)

Les travaux liés en particulier à l'ingénierie dans l'étude du comportement énergétique ont été identifiés à travers une classification des mots clés les plus récurrents dans les travaux de littérature par (Carlucci et al., 2020). Cette analyse montre la variété des domaines auxquels est

associé ce sujet ainsi que les intersections entre plusieurs paramètres qui est nécessaire lors de l'étude du comportement énergétique (**Figure 16**). Dans le cas des travaux techniques liés à l'ingénierie, la plupart des publications dans les journaux scientifiques concernent l'énergie et le bâtiment.

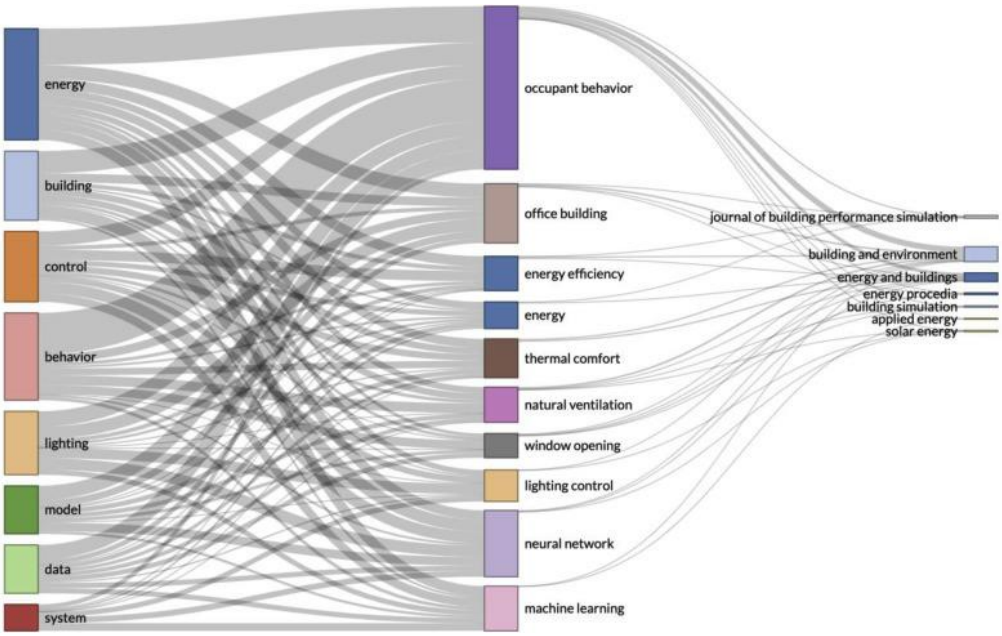


Figure 16 : Mots clés les plus récurrents liés en comportement énergétique dans le bâtiment
Source : (Carlucci et al., 2020)

De notre côté et afin de pouvoir cerner au mieux l'ensemble du sujet et ses différentes disciplines, nous nous sommes basés sur la méthode SMS (Systematic Mapping Study) (James et al., 2016) afin d'identifier les mots clés qui nous permettent d'accéder à différents travaux dans les multiples disciplines et de pouvoir construire une approche pluridisciplinaire. Un autre objectif est de pouvoir se positionner par rapport aux méthodes et outils qui conviennent aux besoins de notre étude et qui ont été utilisés dans d'autres travaux.

La méthode SMS est une méthode qui permet de catégoriser et d'organiser les travaux de littérature existants sur un sujet particulier. Elle permet d'obtenir un aperçu d'un domaine de la recherche et dans quelle mesure il est couvert dans la recherche. Cela permet aussi d'identifier les gaps et niches dans lesquels un travail de recherche peut venir s'ajouter et remplir le vide existant dans la littérature (Grant and Booth, 2009).

La méthode se base sur :

- Une définition des questions de recherche, ce qui permet de définir les champs d'intérêt ou d'examen,
- Un choix des bases de données de recherche,
- La création de chaines de recherche par groupes à partir des différents mots clés,
- La définition des critères d'exclusion pour les travaux de recherche : les travaux dupliqués, une même étude publiée dans diverses sources, les études publiées avant ou après une date précise.

Dans le cadre de cette méthode, nous avons jugé que les questions auxquelles il faut répondre sont les suivantes :

- Qu'est-ce que le comportement énergétique dans le bâtiment ?
- Comment mesurer le comportement en général, et le comportement énergétique en particulier dans le bâtiment ?
- Comment modéliser le comportement des occupants dans le bâtiment ?
- Comment prédire le comportement humain dans le bâtiment ?
- Comment le comportement des occupants impacte-t-il les consommations énergétiques ?
- Qu'est-ce que le comportement pro-environnemental ?
- Quels facteurs dictent le comportement pro-environnemental dans le bâtiment ?
- Comment changer le comportement pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments ?

Pour répondre à ces questionnements, nous avons dressé une liste de mots clés qui nous ont permis de consulter différents travaux de recherche. À la suite de l'application de la méthode SMS, nous avons pu dresser la cartographie de recherche que nous représentons dans la (**Figure 17**). Cette cartographie présente l'ensemble des mots clés et des approches pluridisciplinaires liées au comportement énergétique dans le bâtiment. Ces mots clés nous orientent dans différentes disciplines. Tout d'abord, si nous regardons les méthodes pour mesurer, modéliser et changer le comportement, les disciplines sont variées entre ingénierie, économie, psychologie et autres. Ensuite, il est important de regarder le comportement en tant qu'actions et activités à capter par des outils technologiques ou à comprendre par des théories du comportement. L'occupant en tant que responsable du comportement est aussi étudié par du profilage, une étude des caractéristiques et facteurs qui dictent son comportement. Enfin, le bâtiment avec ses différentes branches et secteurs, résidentiel, commercial, bureau, d'éducation ou autres, neuf ou en rénovation ainsi que ses différents systèmes sont aussi à spécifier. L'objectif étant de tenir compte du comportement de ses occupants afin d'améliorer son efficacité énergétique, d'évaluer les gains possibles ou de mieux piloter ses systèmes.
L'État de l'art qui va suivre dans ce chapitre a pour objectif de répondre aux questionnements préalablement posés afin de représenter une base pour notre étude.

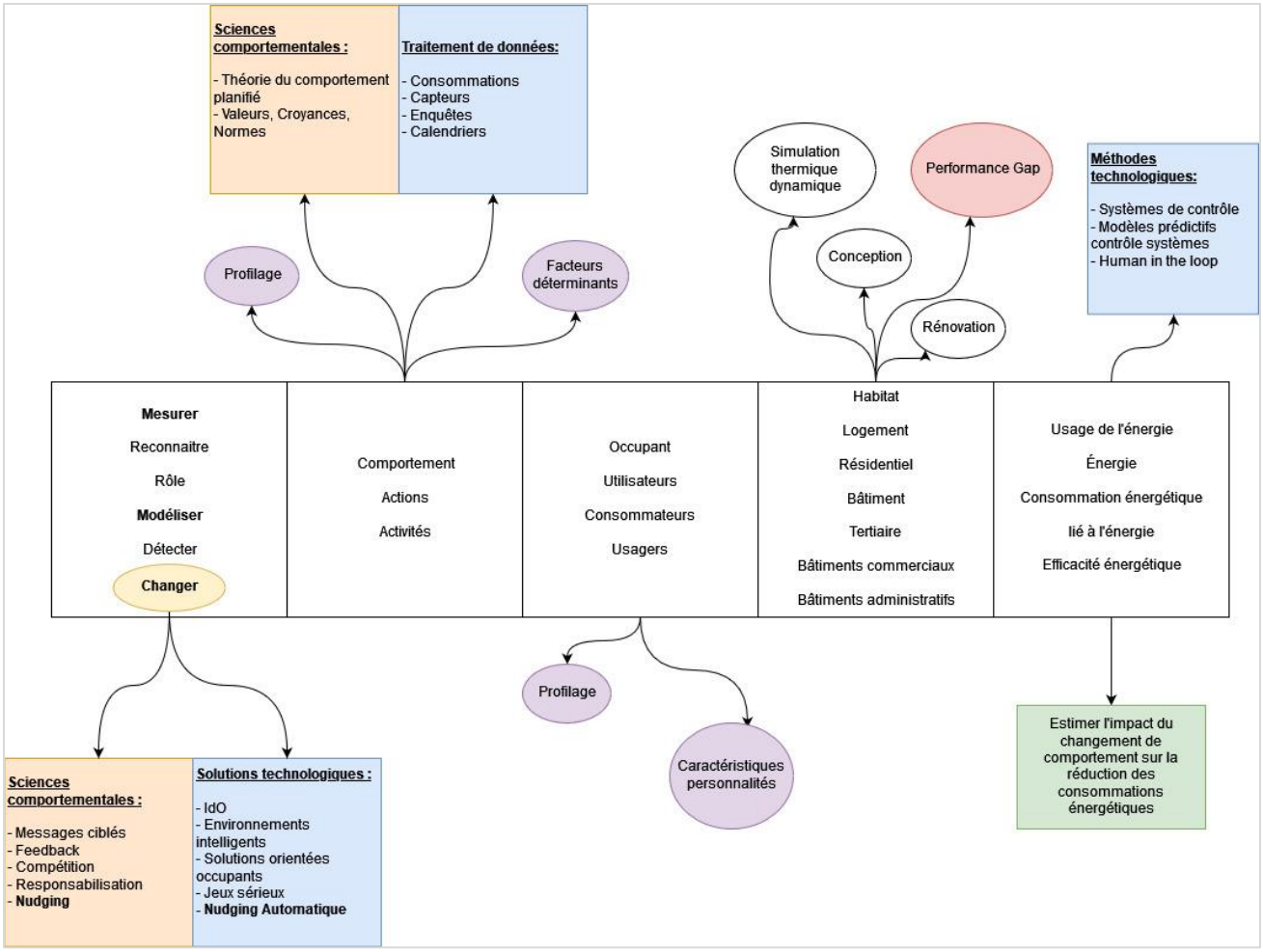


Figure 17 : Résumé des thématiques et disciplines liées au comportement énergétique dans le bâtiment
Source : Auteur

2 *Mesurer le comportement énergétique*

Mesurer le comportement énergétique dans le bâtiment consiste à collecter un nombre de données suffisantes. Ce qui permet dans un deuxième temps, après traitement, de comprendre ce comportement, de le modéliser et de tirer des conclusions. Dans la littérature, les trois objectifs essentiels derrière la collecte des données concernant le comportement des occupants dans le bâtiment sont :

- La création de profils de consommateurs (Aragon et al., 2019)
- La création de modèles mathématiques pour modéliser le comportement et prédire les consommations d'énergie du bâtiment (Bottaccioli et al., 2017)
- L'exploration de l'impact du comportement des occupants et leurs activités sur les consommations énergétiques dans le bâtiment

La collecte de données peut se faire grâce à des capteurs physiques dont les technologies sont variées notamment pour les capteurs intelligents, ou à travers des capteurs non physiques représentés sous forme de questionnaires, d'enquêtes d'usage d'énergie (Deme Belafi et al., 2018) ou de journaux de suivi d'activités (Hong et al., 2017). (Barthelmes et al., 2018) utilisent un questionnaire, un journal de dépenses et un journal d'activités pour collecter des données concernant les activités des occupants avec un pas de temps de 10 à 15 min pour créer des

profils d'usage. Ces méthodes non physiques présentent toutefois la contrainte de l'« effet d'observation » (Batier, 2015) selon lequel les participants sous l'influence de l'observation peuvent fournir des réponses biaisées afin de s'aligner sur les objectifs de l'étude. Cela peut alors créé une différence entre les comportements auto déclarés et les comportements réels.

Afin de capter le comportement des occupants dans les bâtiments, les données collectées concernent la présence des occupants (Jeon et al., 2018 ; Zou et al., 2018) mais aussi toutes les interactions des occupants avec les systèmes du bâtiment à savoir les ouvrants, les systèmes d'occultation, l'éclairage et les systèmes CVC. La collecte des données concernant l'environnement interne et externe du bâtiment est aussi importante afin d'établir un lien entre les conditions environnementales autour du bâtiment et le comportement des occupants (Bellavista et al., 2017; Casado-Mansilla et al., 2018). Dans certaines études, cette collecte de données s'établit à travers un processus expérimental (Klege et al., 2022 ; Nguyen and Aiello, 2012). D'après (Du et al., 2020), ce processus expérimental de collecte de données commence par une définition des objectifs de l'étude concernant le comportement des occupants suivie par une détermination des comportements ciblés, sujets de l'étude. Les paramètres permettant d'identifier les comportements doivent être ensuite sélectionnés afin de connaître les types de données à collecter et les capteurs à utiliser. Le processus de mesure commence alors avec un choix de l'échantillon d'étude et des bâtiments ciblés en parallèle avec le choix de l'intervalle de temps de collecte des données et la durée des mesures. Après l'installation du système de mesure, une étape de vérification de faisabilité et de validation des mesures est nécessaire (**Figure 18**).

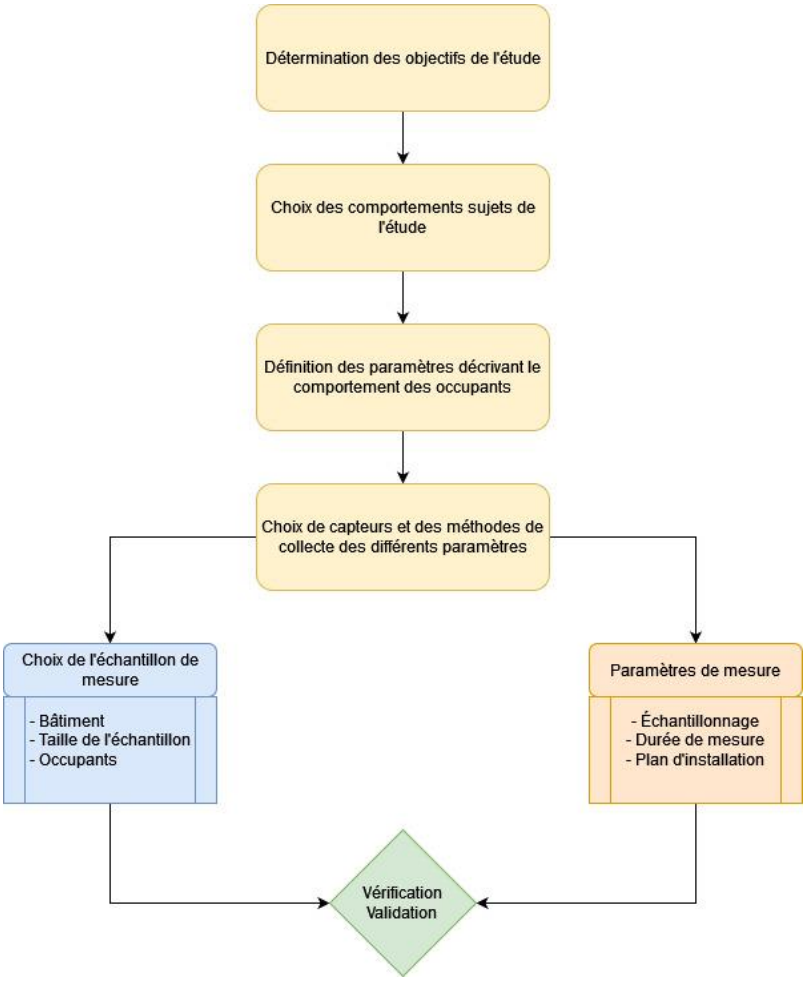


Figure 18 : Étapes du processus de mesure ; inspiré des travaux de (Du et al., 2020)

Dans le tableau ci-dessous (**Tableau 3**), nous résumons les paramètres dont les données sont collectées afin de définir les interactions avec les différents systèmes du bâtiment :

Information recherchée	Données collectées
Présence des occupants	- Détection de présence (Kjærgaard and Sangogboye, 2017) - Quantité de CO_2 émis (Calì et al., 2015)
Éclairage	- Puissance électrique - Énergie consommée
Ouverture / Fermeture des fenêtres	- Détection par contact d'ouverture / Fermeture des fenêtres (Tien et al., 2021) - Température air intérieur (Yun and Steemers, 2008) - Taux d'humidité (Markovic et al., 2017) - Quantité de CO_2 émis
Système de refroidissement	- Puissance électrique - Consommation d'énergie - Consignes de température - Température d'arrivée d'air - Température de l'air extrait - Température intérieure - Température extérieure - Radiations solaires - Vitesse et direction du vent (Wang et al., 2018)
Système de chauffage	- Puissance électrique - Consommation d'énergie - Consignes - Température intérieure - Température extérieure - Radiations solaires - Vitesse et direction du vent (Kumar et al., 2018)
Équipements électriques	- Puissance électrique - Énergie consommée

Tableau 3 : Paramètres caractérisant les interactions de l'occupant avec le bâtiment

Les avancées technologiques dans les domaines de l'électrique et de l'informatique ont facilité l'acquisition des données capables de refléter le comportement des occupants au sein du bâtiment mais aussi d'augmenter la précision de ces données (Jia et al., 2017). Plusieurs appareils sont déployés dans la mesure du comportement dans le bâtiment. (Wagner et al., 2018) classifient ces capteurs physiques suivant qu'ils soient :

- Basés sur l'image,
- Capteurs de seuils ou mécaniques,
- Capteurs de mouvement,
- Systèmes radio,
- Capteurs de consommation.

Les capteurs de seuil et mécaniques englobent les interrupteurs Reed[18], les contacts de portes ou de fenêtres, les capteurs piézoélectriques[19], ou autres. Les systèmes basés sur la radio se sont largement répandus avec l'avènement des smartphones. Ils englobent plusieurs technologies telles que Wifi, Bluetooth et GPS. Pour ce qui est des capteurs basés sur l'image, comme les caméras, ils présentent des contraintes liées au respect de la vie privée, ce qui restreint leur application.

La technologie des réseaux de capteurs sans fil est la plus commune et la plus utilisée dans les travaux de recherche. Grâce à un ensemble de nœuds composées de micro-capteurs, les réseaux de capteurs sans fils permettent de recueillir et de transmettre de façon autonome les données de température, d'humidité, de quantité de CO_2, de son, de luminosité, etc. L'usage d'une technologie sans fil offre l'avantage de coûts opérationnels et de maintenance réduits (Hayat et al., 2019).
(Rafsanjani and Ghahramani, 2019) ont utilisé une infrastructure IdO pour récupérer les informations concernant les comportements des occupants dans les bâtiments commerciaux en vue de déterminer les profils des différents consommateurs. En ce qui concerne les bâtiments résidentiels, (Andrei et al., 2018) présentent une solution qui permet de surveiller les paramètres de confort intérieur (température, humidité, luminosité). Pour cela ils utilisent des capteurs sans fil pour collecter de façon rapide des informations utiles, les traiter, les analyser et les intégrer dans une application tierce. L'objectif de la solution est d'améliorer la gestion intelligente de la consommation d'énergie tout en garantissant des conditions optimales de confort thermique et visuel pour les occupants.

Concernant les mesures de consommation, la désagrégation des charges fait partie des méthodes utilisées afin de mesurer le comportement des occupants et créer des courbes d'usage. Depuis les années 1980, un intérêt croissant est porté par la communauté scientifique sur les travaux qui concernent le développement de techniques permettant l'identification et le classement des consommations et des usages électriques suivant le profil de la courbe de charge individuelle de chaque équipement (Dufour, 2017). La désagrégation des charges signifie la décomposition de la consommation globale d'énergie en différentes consommations suivant l'usage de chaque appareil et sa consommation correspondante. On distingue dans ce domaine trois différentes approches. D'abord l'approche de suivi intrusif de la charge (Intrusive Load Monitoring–ILM) se base sur des sous compteurs qui calculent la consommation énergétique de chaque appareil. Ensuite, selon le suivi semi-intrusif de la charge (Semi-Intrusive Load Monitoring–SILM),les sous compteurs ne sont pas reliés à chaque appareil mais à un groupe d'appareils (Meziane, 2016). (Tang et al., 2014) proposent dans ce contexte une méthodologie pour déterminer le nombre minimal de compteurs à utiliser pour un large panel d'appareils tout en évitant un chevauchement de données entre les différents appareils. Enfin, l'approche non intrusive (Non-Intrusive appliance Load Monitoring – NILM) ne nécessite ni compteurs ni intervention au sein du bâtiment, elle se base sur des solutions logicielles et sur le développement d'algorithmes capables de détecter la consommation énergétique totale à travers des capteurs d'énergie virtuels pour chaque appareil (Stankovic et al., 2016).

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche se sont aussi penchés récemment sur le développement de nouvelles approches de reconnaissance d'activité visant la gestion de l'énergie dans le bâtiment (Ahmadi-Karvigh et al., 2018 ; Marcello et al., 2019). On distingue dans les techniques de reconnaissance d'activités celles qui sont Online et celles qui sont Offline. Les premières utilisent des données en temps réel (Real-time Data) et les secondes des données

[18] C'est un capteur magnétique qui permet de détecter la présence d'un champ magnétique. Il est actionné lors de l'approche d'un aimant. Il peut par exemple être utilisé comme capteur d'ouverture ou de fermeture de porte.

[19] C'est un capteur qui permet d'obtenir une charge électrique proportionnelle à la contrainte mécanique appliquée.

historiques stockées. Dans ce dernier cas, les activités sont détectées alors qu'elles sont achevées, contrairement à la détection Online qui reconnait les activités au fur et à mesure de leur réalisation. C'est pourquoi les données qui décrivent les activités repérées dans le cas de la reconnaissance Offline sont complètement observées alors qu'elles sont partiellement observées dans le cas de la reconnaissance Online.

La modélisation du comportement est la raison essentielle de la mesure du comportement de l'occupant au sein du bâtiment (Balvedi et al., 2018). Elle permet aussi d'intégrer le comportement des occupants dans les simulations thermiques. Étant donné que ce volet représente une partie de notre étude, nous nous intéresserons dans la section suivante aux techniques de modélisation du comportement des occupants dans le bâtiment et son utilisation dans la STD.

3 *Simulation thermique dynamique et modélisation du comportement*

3.1 *Écart prédictions – consommations dans la STD*

À la fin des années 1980, les méthodes les plus utilisés pour étudier la performance thermique des bâtiments sont des méthodes simplifiées qui se basent sur les calculs conventionnels des réglementations thermiques comme le rapport mensuel de la réglementation thermique de 1988. Le développement des outils informatiques a permis le développement de nouvelles méthodes plus détaillées sous forme de logiciels de simulation thermique dynamique alors restreints aux professionnels étant donné leur coût élevé mais qui se sont davantage intégrées au processus de conception au fur et à mesure de l'évolution des exigences des performances énergétiques. Basés d'abord sur l'application de l'équation de chaleur sur les zones thermiques, ces logiciels ont connu des améliorations afin de réduire le temps de calcul mais aussi améliorer les résultats à travers des travaux de validation par des mesures réelles (Peuportier and Schalbart, 2022).

La STD est utilisée pour calculer, sur une période de temps, le comportement thermique d'un bâtiment. Elle se base sur le principe des « zones thermiques » qui font référence à des espaces avec des températures différentes pour calculer sur un pas de temps les échanges de chaleur entre les zones, les parois et les matériaux. En tenant compte de plusieurs paramètres - météo, enveloppe, matériaux, scénarios, équipements, menuiseries, etc. – elle permet de définir les besoins de chauffage et de refroidissement dans les bâtiments, les consommations énergétiques des différents équipements et les indicateurs de confort thermique.

Les logiciels de STD représentaient à la base un outil pour dimensionner les systèmes du bâtiment et fixer des choix architecturaux mais ils sont devenus ensuite un moyen de plus en plus utilisé lors de la phase de conception afin de prédire les consommations du bâtiment et établir certaines garanties de performance énergétique.

On distingue deux objectifs de l'usage des logiciels de simulation thermique dynamique dans la phase de conception :

- <u>Les calculs conventionnels</u> sont réalisés dans le cadre d'un contexte réglementaire nécessitant une conformité à une exigence comme dans le cas du diagnostic de performance énergétique (DPE) qui représente une référence de performance par rapport à des bâtiments semblables.

- Le calcul prévisionnel a pour objectif de prédire les consommations du bâtiment afin de pouvoir apporter les améliorations nécessaires en phase de conception et optimiser le projet. Il se base sur des données météorologiques locales, des scénarios d'occupation et d'usages et permet d'identifier l'impact de plusieurs paramètres, ce qui en fait un outil efficace d'aide à la décision (Mondrup, et al., 2014).

Selon les logiciels, plus au moins de données de sorties peuvent être obtenues à partir des données entrées. De plus en plus de paramètres sont introduits dans la simulation thermique dynamique afin d'augmenter la qualité des prédictions : climat, architecture, équipement, scénarios d'occupations, etc. Cependant, si ces logiciels sont de plus en plus exacts en ce qui concerne les transferts thermiques et le type de matériaux et isolants utilisés, les données concernant les activités des occupants et leurs interactions avec le bâtiment manquent de précision.

Plusieurs travaux et expériences (Eguaras-Martínez et al., 2014, Kang et al., 2022) ont montré que dans la plupart des cas les performances initialement estompées par simulation dans la phase de conception sont différentes des consommations réelles quand le bâtiment est confronté à des utilisateurs humains. Les différences sont parfois conséquentes. Cet écart est d'autant plus grand si la performance énergétique souhaitée est grande. Certes, la présence des occupants exige l'établissement d'un certain niveau de confort assurant leur bien-être à tous les niveaux, ce qui est pris en compte dans la définition des scénarios des simulations thermiques dynamiques suivant les normes de confort en vigueur, cependant, l'occupant n'adopte pas obligatoirement le comportement prévu par ces simulations thermiques dynamiques et réalisent des actions qui conduisent à une surconsommation inutile : luminaires allumés en cas d'absence d'occupants, fenêtres ouvertes avec système de chauffage en marche, appareils électriques non utilisés en marche (J. Li et al., 2019), pouvant conduire à 30 % de gaspillage d'énergie (Carmenate et al., 2016). D'après (Gunay et al., 2016a), et en se basant sur un étude sur 10 bureaux en utilisant des capteurs pour mesurer la consommation des équipements de bureau, 75 % des consommations des bureaux sont réalisées lors des période d'absence des occupants, en particulier durant les weekend. Ces consommations sont liées à l'usage des ordinateurs portables et fixes et les équipements électriques de bureau : ne pas éteindre les équipements en quittant le bureau, ou durant les heures de pause. 75 % des usagers désactivent le mode d'économie d'énergie sur les ordinateurs.

(Hong et al., 2017) présentent deux méthodes pour analyser l'écart de performance créé par le comportement des occupants. La première est réalisée à travers une comparaison des consommations de bâtiments semblables occupés par des personnes différentes. Une étude menée par (Parker et al., 2012) a montré que l'énergie totale utilisée par dix maisons identiques (se trouvant au même endroit, construites à la même période, ayant la même surface et la même construction) pouvait varier d'un facteur allant jusqu'à 3 et même jusqu'à 10 suivant le type de bâtiment et le confort qu'il procure. Les travaux de (Fabi et al., 2012) et (Gunay et al., 2013) attestent eux aussi du même constat. (Mangruwa et al., 2015) ont relaté une consommation d'énergie presque égale entre les foyers japonais et les foyers malaisiens alors que la population japonaise est trois fois plus élevée que celle en Malaisie. Cette différence est expliquée par la politique de réduction d'énergie adoptée au Japon qui vise à accroitre la conscience de la part des utilisateurs. Les auteurs recommandent que pour suivre le modèle japonais les efforts doivent se tourner vers une sensibilisation de l'occupant sur l'usage de l'énergie et les répercussions du gaspillage d'énergie.

La seconde méthode consiste à comparer les consommations prédites et les consommations réelles une fois le bâtiment occupé. Une étude basée sur 62 bâtiments (van Dronkelaar et al., 2016) a montré une différence de 34 % entre les consommations prédites et celles réelles.

D'après ces auteurs, le comportement des occupants est estimé être responsable à hauteur de 10 à 80 % des différences perçues entre les consommations prédites et réelles.
Cet écart de consommations ne concerne pas seulement les consommations prédites, mais aussi les consommations réglementaires auxquelles doit répondre le bâtiment une fois occupé et qui s'avèrent différente de celles réelles (Zou et al., 2018). L'être humain est hédoniste, il agit sur son environnement et sur lui-même tout en cherchant son confort. Ses actions sont loin d'être idéales comme le présente la réglementation thermique (Batier, 2015).
L'« écart de performance » est expliqué dans la littérature par plusieurs raisons, certaines sont intrinsèques, d'autres d'ordre environnemental ou d'autres encore liées à l'occupant (Josse, 2017) :

- L'outil de simulation lui-même : tous les composants ne sont pas pris en compte ou manque de précision dans les modèles ou les données disponibles (van Dronkelaar et al., 2016) ;
- La non-conformité entre la conception et l'exécution : due à la différence entre les travaux d'exécution sur chantier et la conception initiale (matériaux, fenêtres, systèmes énergétiques). L'existant n'est pas conforme à la conception (Shi et al., 2019) ;
- L'environnement : les données climatiques et spatiales sont variables ;
- Le réglage des installations (systèmes de réglage physiques, systèmes de gestion et de régulation, etc.) ;
- Actions manuelles des occupants (Shi et al., 2019).

Par ailleurs, une revue de littérature réalisée par (Mahdavi et al., 2021) concernant les derniers articles qui traitent de l' « écart de performance » montre que seulement 40 % des travaux analysés ont pu prouver le lien entre les écarts de consommations et le comportement des occupants. Ceci n'annule pas pour autant l'impact du comportement des occupants sur la création de cet écart.

Cet impact est résumé par (Vorger, 2015) dans ce qui suit (**Figure 19**):

- La présence de l'occupant signifie non seulement qu'il représente une source de chaleur, d'humidité et de CO_2 dégagé par le corps mais aussi qu'il est capable d'effectuer des actions conduisant à une consommation d'énergie dans le bâtiment.
- Les ouvertures et fermetures des portes et des fenêtres sont responsables de la modification de la température et de la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment.
- Les ouvertures et fermetures des stores et des systèmes d'occultation définissent le niveau d'éclairement ainsi que l'apport solaire. Elles ont donc un impact sur l'utilisation de l'éclairage artificiel et du système de refroidissement.
- L'utilisation de l'éclairage artificiel et des équipements électriques est liée à une consommation directe de l'énergie électrique et impacte aussi la température interne à travers la chaleur dégagée par Effet Joule.
- Les consignes ont un impact direct sur les consommations de chauffage et de climatisation.
- L'utilisation de l'eau chaude sanitaire impacte directement les consommations énergétiques mais aussi mène à un changement dans la température interne et l'humidité.

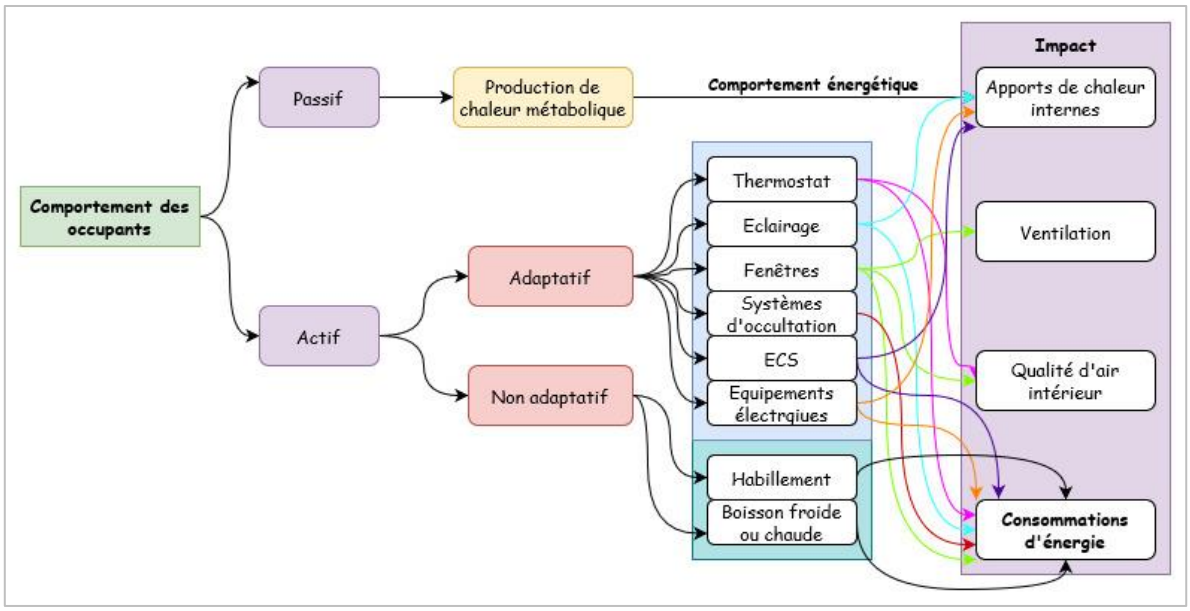


Figure 19 : Impact du comportement de l'occupant sur les consommations énergétiques
Source : d'après (Ebuy et al., 2021)

Dans ce contexte, il est important de citer la Post Occupancy Evaluation (POE) comme outil permettant d'évaluer la performance d'un bâtiment à plusieurs moments de sa vie et de son occupation. À travers des questionnaires, des enquêtes auprès des occupants et des campagnes de mesures, la POE est au centre de plusieurs sujets de recherche notamment ceux liés à la performance énergétique des bâtiments et l'usage de l'énergie (Li et al., 2018). Parmi les méthodes utilisées, on retrouve les interviews et les témoignages des occupants appelés « stories ». (Day and O'Brien, 2017) traitent par exemple des motivations derrière les comportements des occupants dans le bâtiment et les sources d'inconfort. Cette étude montre que les efforts d'automatisation peuvent parfois conduire à un effet rebond et donc à plus de consommations d'énergie ainsi qu'à des situations d'inconfort.

Les travaux de (Ki Kim et al., 2021) quant à eux ont permis à travers la POE de montrer l'existence du performance gap entre les consommations prédites et les consommations réelles. Cette différence est justifiée par des scénarios d'usage des systèmes du bâtiment (éclairage, ventilation, consignes de climatisation) différents de ceux pris en compte lors de la phase de simulation thermique dynamique. Les résultats de la POE sont utilisés afin de calibrer le modèle de simulation thermique dynamique de telle façon que les consommations réelles se rapprochent des consommations prédites. Le comportement des occupants est aussi orienté afin qu'il se rapproche le plus des scénarios établis lors de la conception afin d'éviter les 25 % de surconsommations constatées en usage réel dans le cadre de l'étude.

Ceci nous rappelle les deux solutions proposées par (Darakdjian et al., 2018a) afin de pallier les résultats éloignés de la réalité obtenus à partir des simulations thermiques dynamiques :

- La première solution consiste à améliorer la performance des prédictions en essayant d'améliorer les outils de modélisation du comportement des occupants dans le bâtiment afin de se rapprocher le plus possible du cas réel.
- La seconde solution consiste à changer la façon avec laquelle les occupants se comportent dans le bâtiment en essayant de la rapprocher au maximum d'un comportement vertueux qui assurera de faibles consommations énergétiques telles que prédites. Cette solution doit se baser, d'après les auteurs, sur des méthodes douces de sensibilisation et non des mesures coercitives qui restreignent la liberté des occupants et

engendrent une diminution du confort des usagers ce qui ne répondrait alors pas aux objectifs de l'efficacité énergétique.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les outils permettant de modéliser le comportement des occupants dans la STD, avant de nous pencher sur les méthodes utilisées pour changer le comportement.

3.2 *Modélisation des comportements dans la STD*

Une enquête sous forme de questionnaire a été conduite auprès des concepteurs de bâtiments et chercheurs pour évaluer à quel point les outils de simulation (EnergyPlus, DOE-2, DeST, ESP-r, TRNSYS, IDA-ICE, COMFIE, et DesignBuilder) sont utilisés dans les bureaux d'études afin de représenter le comportement des occupants dans le bâtiment en interaction avec son environnement. Les résultats de cette enquête ont montré que malgré les différences dans les approches de simulation de ces logiciels, ils sont tous limités à un modèle statique et simple du comportement (D'Oca et al., 2018).

La majorité des travaux de modélisation et de simulation de la consommation énergétique dans les bâtiments prend en considération un seul utilisateur et des profils statiques. Ce qui est irréel vu que le comportement humain est plus compliqué que ces simples profils. Typiquement, dans les simulateurs de bâtiments seule la chaleur dégagée par la présence d'occupants est prise en compte. On s'intéresse davantage à la présence ou l'absence de l'occupant plutôt qu'à la façon avec laquelle il agit pour consommer de l'énergie (Kashif, 2014).

Les actions humaines ayant un caractère par nature inexplicable et imprédictible, il peut paraitre difficile d'imaginer la possibilité de reproduire les actions irrationnelles des personnes ou de les représenter comme des profils bien définis qui reproduisent toujours le même comportement.
La modélisation du comportement des occupants permet de développer des modèles permettant de refléter le comportement humain en se basant sur l'idée que derrière chaque action se cache une certaine motivation la dictant. Le problème réside cependant dans la possibilité de généraliser ces résultats compte tenu des différences qui existent entre les occupants dans un bâtiment. Comme avancé dans (Tewolde et al., 2013), il existe trois grandes contraintes concernant la modélisation des comportements des occupants des bâtiments :

- L'élaboration de modèles simplifiés qui peuvent s'éloigner de la réalité ;
- L'absence de standards scientifiques pour valider les modèles développés ;
- La difficulté de modéliser plusieurs comportements différents surtout en présence de plusieurs occupants.

La modélisation du comportement des occupants dans le bâtiment en se basant sur les données collectées représente une étape cruciale dans l'étude du comportement des occupants permettant d'atteindre plusieurs objectifs que nous recensons comme suit :

- La prédiction des comportements et des consommations énergétiques des profils créés par collecte de données (Woo et al., 2018).
- L'amélioration de l'exactitude des résultats des simulations thermiques dynamiques pour l'estimation des consommations énergétiques des bâtiments en intégrant les comportements de leurs occupants (Vorger, 2015).
- L'intégration des modèles des occupants dans les systèmes de gestion et de contrôle de l'énergie afin de tenir compte des besoins des occupants et leurs interactions avec le bâtiment (Sembroiz et al., 2019).

D'après (Norouziasl et al., 2021), presque la moitié des travaux ont pour objectifs d'estimer de manière plus précise les consommations énergétiques des bâtiments en tenant compte des activités humaines et 36 % cherchent à prédire les comportements et les consommations futurs des profils étudiés.

Nous nous intéressons dans ce qui suit aux travaux qui ont permis d'intégrer des modèles de comportement des occupants dans la simulation thermique dynamique en liaison avec les caractéristiques du bâtiment. (Darakdjian et al., 2018b) proposent de classer les méthodes de modélisation en deux grands groupes. Le premier est uniquement lié à la présence et aux activités effectuées par les occupants indépendamment des données environnementales du bâtiment. Il peut donc être utilisé avant le lancement de la simulation. Le deuxième groupe concerne la prise en compte des actions adaptatives et non adaptatives. On entend par action adaptative celle qui est entreprise par les occupants pour établir un certain niveau de confort, comme l'ouverture et la fermeture des fenêtres, l'utilisation des stores ou de l'éclairage. Les actions non adaptatives sont cependant celles qui ne sont liées à aucun besoin en confort comme l'utilisation des appareils électriques. L'Annexe 66 de l'IEA EBC (Energy in Buildings and Community) (IEA, 2017) présente un récapitulatif de ces modèles. Nous énumérons ces modèles et la façon dont ils sont intégrés dans la STD.

3.2.1 *Modèles de comportement et intégration en STD*

- **Les modèles déterministes**

Les modèles déterministes sont utilisés dans la plupart des logiciels de simulation thermique dynamique. Ils se basent sur des calendriers permettant de représenter un phénomène dynamique répétitif comme l'occupation, les apports métaboliques internes liés à la chaleur dégagée par les occupants ou celle dégagée par les équipements électriques (Batier, 2015). Ces calendriers se basent à leur tour sur des valeurs moyennes pour représenter et traduire le comportement. (Du and Pan, 2021) utilisent une combinaison de méthodes déterministes et stochastiques afin de simuler les gains d'énergie suite à un usage modéré du système de chauffage. (Karjalainen, 2016) génère plusieurs scénarios de comportement déterministe. Suivant les logiciels, la considération de la réponse unique des occupants à des stimuli physiques peut être intégrée par exemple comme le fait d'ouvrir les fenêtres à partir d'un seuil de température. L'usage des modèles déterministes présente l'avantage de la rapidité dans la génération d'une part importante des résultats (Stoppel and Leite, 2014), cependant ce type de modèles ne permet qu'une réponse unique sans intervalle de confiance et ne tient donc pas compte de la variété des occupants.

- **Les modèles statistiques**

Il s'agit d'une analyse mathématique basée sur des données réelles. L'objectif est d'établir une relation numérique entre le comportement des occupants et les variables explicatives afin de pouvoir par la suite faire des prédictions en se basant sur de nouveaux sets de données. Les travaux de (Mahdavi and Tahmasebi, 2015), par exemple, investiguent la relation entre l'environnement et le comportement des occupants. Les méthodes les plus utilisées dans la littérature sont les méthodes de régression visant à estimer la probabilité d'occurrence des actions suivant les paramètres d'entrée (Mathieu et al., 2011). D'autres techniques sont aussi utilisées comme la loi de Bernoulli par exemple qui est employée pour définir la probabilité de production d'une action (ouverture des fenêtres par exemple) en fonction de la variation d'une variable (radiation solaire dépassant un niveau maximal) (Gunay et al., 2015, Zhao et al., 2014).

- **Les modèles stochastiques :**

Ils sont efficaces pour la représentation du comportement des occupants dans les bâtiments compte-tenu de l'aspect naturellement aléatoire de ce genre d'interactions. Les méthodes

stochastiques affectent de manière aléatoire les valeurs numériques du système au cours du temps. Ainsi sont générés les scénarios d'occupation (Z. Chen et al., 2015) et d'usage des systèmes du bâtiment (Jang and Kang, 2016). Les modèles stochastiques permettent d'apporter un aspect aléatoire à la modélisation des comportements à travers des scénarios de présence non répétitifs et donc de se rapprocher de la réalité contrairement au cas des modèles déterministes où le comportement est prédéfini (Marschall, 2019). (Cowie et al., 2017) présentent les logiciels qui ont été développés pour générer des modèles stochastiques en se basant sur des mesures et en proposant des relations entre les variables explicatives et les variables à expliquer. Les plus répondues sont les chaines de Markov (Zhang and Jia, 2016) qui se basent sur des matrices de transitions d'états (Andersen et al., 2014). Elles peuvent être généralisées pour modéliser les actions adaptatives des occupants. (Haldi, 2010) développe à partir de chaînes de Markov deux modèles de prédiction des actions sur les fenêtres et sur les stores. (Chen et al., 2015) proposent aussi deux modèles d'occupation stochastiques basés sur les chaines de Markov destinés à être utilisés comme des données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques. La méthode Monte Carlo est aussi utilisée (Zaraket, 2014) et notamment dans les travaux de thèse de (Zaraket, 2014), (Bonte, 2014) et (Vorger, 2015). Cette méthode consiste à réaliser plusieurs simulations pour une même configuration, ce qui permet d'obtenir en sorties des indicateurs de performance énergétique et de confort.

- **Le Data Mining et le Machine Learning**

Ces méthodes sont utilisées avec une quantité importante de données qui, une fois traitées, permettent à travers les méthodes d'apprentissage de créer des profils liés à un usage spécifique de l'énergie (D'Oca and Hong, 2015 ; Ren et al., 2015). Les techniques du maching learning (apprentissage automatique) permettent d'identifier les itérations de certaines configurations dans les données et de les utiliser comme base pour prédire les futures valeurs. Les réseaux de neurones[20] sont les plus utilisés pour établir des modèles de comportements (Grillone et al., 2020). Les machines à vecteurs de support[21] sont aussi utilisées dans la littérature pour modéliser le bâtiment et le comportement de ses occupants (Wei et al., 2018). D'autres techniques comme les forêts aléatoires[22] (Ahmad et al., 2017) et le boosting à gradient[23] sont aussi utilisées (Touzani et al., 2018). Ces méthodes peuvent être soit utilisés pour établir un modèle de base du bâtiment qui peut être couplé aux logiciels de simulation thermique dynamique afin d'apporter des améliorations (Zhang et al., 2022 ; Al-Habaibeh et al., 2021), soit pour être couplés à des systèmes de gestion du bâtiment (Gupta et al., 2021), soit pour prédire les consommations du bâtiment (Dai et al., 2020).

- **Les modèles Multi-agents**

Ce sont des modèles basés sur la création d'agents virtuels[24] et la simulation des interactions entre eux (Alaa Alfakara and Ben Croxford, 2014) et celles avec l'environnement qui les entoure. Des lois sont mises en place afin de déterminer le choix des agents et guider leur évolution. Ces paramètres peuvent être définis à travers des enquêtes englobant les préférences des occupants (Andrews, C.J. et al., 2013), une collecte de données (Klein et al., 2012) ou des hypothèses concernant les préférences et les besoins de confort des occupants (Lee and Malkawi, 2014a). Ces méthodes tiennent compte du volet psychologique, des besoins en confort des occupants et

[20] Les réseaux de neurones sont des modèles informatiques inspirés du fonctionnement des neurones dans le cerveau humain. Ils sont utilisés pour résoudre des problèmes complexes tels que la classification, la reconnaissance de motifs, et la prédiction.

[21] Algorithmes d'apprentissage automatique utilisés pour la classification et la régression.

[22] Les forêts aléatoires représentent une technique d'apprentissage automatique utilisée pour la classification, la régression et d'autres tâches d'analyse de données.

[23] Technique d'apprentissage automatique utilisée pour améliorer les performances des modèles prédictifs.

des interactions entre eux contrairement aux précédentes. Ce qui caractérise cette approche est sa capacité à s'auto organiser et pouvoir créer de nouvelles structures et règles qui n'étaient pas programmées initialement.

Les travaux de (Kashif, 2014) sont basés sur le logiciel BRAHMS (Business Redesign Agent-Based Holistic Modelling System) qui fait appel à des agents cognitifs qui perçoivent l'environnement et ont des actions délibératives pour le contrôle et la gestion de l'énergie. L'approche tient compte des croyances, désirs et contraintes, et états physiques des occupants. Le but des travaux menés était de décrire avec précision les utilisations de l'électricité dans les maisons intelligentes par des agents influencés par des caractéristiques physiologiques et psychologiques et leurs connaissances antérieures afin d'atteindre un but préalablement défini. Le modèle est ensuite intégré dans le logiciel de simulation thermique dynamique. Plusieurs autres travaux relient la modélisation au concept de confort comme facteur guidant le choix des agents. (Bonte et al., 2013) utilisent les réseaux de neurones pour définir les comportements qui traduisent une situation de confort des occupants. (Lee and Malkawi, 2014) adoptent une approche dans laquelle les agents peuvent agir sur les occultations, le ventilateur, les fenêtres, les portes et leur tenue vestimentaire pour atteindre un niveau de confort thermique. Les plateformes multi-agents recensées dans la littérature sont : BRAHMS utilisée dans (Kashif, 2014) et (Tijani et al., 2015), OASys utilisée dans (Bonte, 2014), NetLogo dans (Andrews et al., 2011), obFMU (functional mockup unit of occupant behavior models) utilisée dans plusieurs travaux et MASS développée sous C++ et utilisée dans (Chapman, 2017) et (Darakdjian, 2017). Ce dernier a établi un tableau comparatif de ces différentes plateformes, voir **Tableau 4** ci-après.

En ce qui concerne l'intégration de ces différents modèles dans la simulation thermique dynamique, (Yan et al., 2015) distinguent quatre approches. La première consiste en une modélisation simple et directe du comportement à travers la définition de valeurs moyennes, de calendriers et de lois conditionnelles. Elle est disponible dans tous les outils de simulation thermique dynamique mais ne permet pas de créer de nouvelles catégories de profils. La deuxième approche est la personnalisation du code. Elle permet à l'utilisateur de modifier la façon selon laquelle le logiciel STD simule le modèle énergétique de bâtiment en offrant un certain degré de modélisation stochastique du comportement des occupants en utilisant des fonctions mathématiques stochastiques intégrées ou définies par l'utilisateur. La troisième approche quant à elle se base sur la personnalisation du cœur de l'outil ce qui offre un degré maximum de flexibilité comparé à une modification d'une partie du code. La dernière approche est la Co-simulation (Naspi et al., 2018). Elle consiste à échanger les données entre une plateforme de modélisation du comportement et un logiciel de simulation thermique dynamique. Cette solution offre plus de flexibilité étant donné que n'importe quel langage permet son intégration et peut être couplée à n'importe quel outil de simulation. Les plateformes multi-agents citées précédemment sont d'ailleurs utilisées dans le cadre de Co-simulation avec des logiciels de STD. Malgré la puissance de cette méthode et la possibilité qu'elle offre de simuler le bâtiment dans sa totalité, elle demeure complexe à mettre en place. Ce genre d'outils est déjà utilisé par certains logiciels de STD afin d'effectuer des calculs qui ne sont pas programmés dans le logiciel de base comme le calcul de l'éclairage naturel par exemple.

3.2.2 *Outils et travaux*

Le site *Building Energy Software Tools*[25] recense une centaine des logiciels de STD. Il permet de les classer suivant les résultats souhaités et les caractéristiques de chacun. Nous présentons ici

[25] https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing?keywords=&field_platform_tid=All&field_price_tid=All&field_last_updated_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&field_language_tid=All&keys=&sort_by=field_rating_rating&sort_order=DESC&items_per_page=40

les plus utilisés dans les projets de recherche concernant la simulation thermique dynamique des bâtiments et l'amélioration de leur performance et qui sont : **DOE-2, TRNSYS** (Muroni et al., 2019, Lu et al., 2017, Rabiu et al., 2022), **Energy Plus** (P. Yadav, 2017, Liu et al., 2022, Singer et al., 2019, Dahanayake and Chow, 2017), **ESP-r** (Boudier et al., 2016, Boudier and Hoffmann, 2019, Decruz, 2016), **Pleiades+Comfie** (Cowie, 2017, Héberlé et al., 2019, Belazi et al., 2022, Pannier et al., 2016, Gul et al., 2018, Merlet et al., 2018), **Dymola** (Landuyt et al., 2021).

(Castaldo and Pisello, 2018) présentent une revue de littérature de ces logiciels et leur utilisation. Une comparaison des résultats de simulation d'un bâtiment par certains de ces logiciels est présentée dans les travaux de (Magni et al., 2021). Ci-dessous une brève présentation de ces logiciels :

- **TRNSYS** est un logiciel commercial de simulation des systèmes transitoires. Il a été développé par l'université du Wisconsin et se base sur une approche systémique de composants avec une structure modulaire. La bibliothèque du logiciel TRNSYS contient un des modules de base comprenant des modèles de bâtiments multizones, des composants pour les systèmes HVAC et des systèmes d'énergies renouvelables avec la possibilité pour l'utilisateur de développer ses propres composants. Des liens avec certains programmes de dessin permettent la saisie des données décrivant le bâtiment.
  (Bonte, 2014) a développé une plateforme Oasys pour modéliser le comportement des occupants couplé avec le logiciel TRNSYS. Elle se base sur les besoins et préférences des occupants pour définir les actions qu'ils entreprennent dans le bâtiment. Dans certains travaux TRNSYS est utilisé pour simuler les consommations du bâtiment en utilisant des modèles stochastiques (Veillette et al., 2021), probabilistes (Donges et al., 2021), ou des méthodes de machine learning.

- **Energy plus** est utilisé pour modéliser la consommation d'énergie totale du bâtiment, de l'éclairage, des équipements électriques et l'usage de l'eau dans les bâtiments. Il est considéré comme étant un logiciel assez complet en plus d'être open-source. Il a été développé par le Département de l'énergie (Department Of Energy DOE) aux Etats Unis. Ce logiciel ne dispose pas d'interface graphique. C'est pourquoi des interfaces comme Design Builder ont été développées et utilisent le moteur de calcul d'Energy Plus. Design Builder permet de réaliser des calculs réglementaires, des certifications et des calculs d'optimisation. Energy Plus est connu pour être le logiciel qui offre le plus de flexibilité comparée aux autres logiciels. C'est d'ailleurs celui qui permet d'opérer les quatre approches d'intégration des modèles de comportement dans la STD cités précédemment. En Co-simulation par exemple, Energy Plus a été couplé aux plateformes multi-agents MASS et ObFmu citées précédemment. Il a aussi fait objet de travaux utilisant des modèles déterministes et stochastiques (Carlucci et al., 2021 ; Khorasani Zadeh and Ouf, 2022 ; Zangheri et al., 2018)

- **Pleiades+Comfie** est composé de l'outil de calcul et de simulation thermique dynamique COMFIE, développé par l'Ecole des Mines de Paris, et l'interface Pleiades développée par IZUBA Energies. Dans le modèle de simulation thermique dynamique COMFIE (Peuportier and Blanc Sommereux, 1988) le bâtiment est divisé en zones thermiques composées de murs, cloisons, fenêtres, équipements… et d'un volumes d'air . Ce logiciel se démarque des autres logiciels de STD par l'ergonomie de son interface utilisateur et par son service d'assistance technique qui fait de lui le logiciel le plus utilisé en France. Il permet aussi de faire des calculs réglementaires, des analyses de cycle de vie et des calculs d'optimisation et de sensibilité. Le logiciel est aussi connu pour la qualité et le niveau avancé de l'exploitation de ses résultats qu'il offre notamment en termes de graphiques, d'image et de synthèses.

Dans le contexte de la modélisation des comportements, Pleiades+COMFIE ne permet pas l'accès au cœur du logiciel qui est restreint aux développeurs. Cependant, les travaux de (Vorger, 2015) ont permis de développer une plateforme qui prend en compte le comportement humain à travers une modélisation stochastique des activités des occupants. Ce travail se base sur la réalisation de plusieurs simulations construites à partir des probabilités d'occurrence de certaines activités générées à partir des données statistiques de l'Institut national de la Statistique et des Études Économiques (INSEE). La multitude de résultats obtenus pour chaque ménage selon qu'il soit occupé par un couple de jeune ou par une famille nombreuse ou par d'autres types d'occupant permet de proposer une fourchette de consommation qui offre une marge d'erreur à prendre en considération.

Ce travail a donné naissance plus tard à l'extension AMAPOLA du logiciel Pleiades+COMFIE développée par IZUBA et qui contient trois modules : analyse d'incertitude, analyse de sensibilité et optimisation (Wurtz et al., 2021). Il tient compte du comportement des occupants et permet d'après IZUBA de :

- Fournir des garanties de performances en quantifiant le risque par rapport à un objectif énergétique, et ce à travers une analyse d'incertitudes qui tient compte de différents profils d'occupants.
- Optimiser la conception en tenant compte de la présence d'occupants qui interagissent avec le bâtiment et ses composants.
- Déterminer les paramètres les plus influents sur les consommations d'énergie à travers l'étude de sensibilité.

- **Dymola** utilisant le langage **Modelica** permet de réaliser des travaux de recherche et développement. Il a été développé par Dassault Systèmes. C'est un outil qui permet de modéliser les systèmes dynamiques complexes. Il n'est donc pas limité au cadre du bâtiment en particulier mais permet de modéliser ses systèmes énergétiques. (Chouikh, 2013) a utilisé par exemple le logiciel pour modéliser le système VMC du bâtiment couplé avec TRNSYS pour la modélisation du bâtiment et la plateforme BRAHMS pour la modélisation du comportement des occupants. Basé sur le langage Modelica, (Z. Wang et al., 2019) développent un package permettant de simuler à partir des modèles stochastiques les comportements des occupants en interaction avec les systèmes d'éclairage, les fenêtres, les systèmes d'occultations et les systèmes de chauffage et de climatisation dans les bâtiment résidentiels et de bureau. Dans le logiciel, les utilisateurs ont la possibilité de créer leur propre bibliothèque modèles en plus de ceux déjà existants.

- **ESP-r** a l'avantage d'être un logiciel open-source développé par l'Université de Strathclyde en Écosse. Il modélise les performances thermiques du bâtiment, les performances visuelles et acoustiques et les émissions de gaz associés. L'utilisateur a la possibilité de modifier les algorithmes et propriétés du logiciel.

Nous résumons dans le tableau ci-dessous un comparatif des logiciels de STD inspiré du comparatif de (Darakdjian, 2017) avec un récapitulatif des travaux utilisant ces logiciels :

Logiciel	Avantages	Inconvénients	Quelques travaux et applications
TRNSYS	- Flexibilité - Modélisation thermique et électrique - Large choix de librairies systèmes - Approche modulaire	- Coûteux - Gestion des géométries	- Système de refroidissement (Jani et al., 2020) - Pompe à chaleur (Safa et al., 2015) - Système ECS (Shrivastava et al., 2017) - Analyse de cycle de vie (Guarino et al., 2016) - Ventilation (Dols et al., 2016)

Energy Plus + Design Builder	- Convivialité de l'interface - Simulations variées - Facilité d'importation et d'exportation - Large utilisation dans les travaux de recherche - Flexibilité - Gratuit	- Interface coûteuse - Peu utilisé en France	- Maison passive (Rodriguez-Ubinas et al., 2014) - Comportement des occupants (Langevin et al., 2014) (Jia and Srinivasan, 2020) - Consommations d'énergie dans le résidentiel (Shabunko et al., 2018) - Eclairage naturel (Queiroz et al., 2020)
Pleiades+ Comfie	- Convivialité de l'interface - Simulations variées - Facilité d'importation et d'exportation - Large utilisation en France	- Coûteux - Flexibilité	- Etude de fiabilité (Recht et al., 2014) - Eco matériaux (Chaussinand et al., 2015) - ACV (Frossard et al., 2018) - Comportement des occupants (Belazi et al., 2018) - Confort des occupants (Badeche, 2022)
Dymola	- Flexibilité - Multitude de domaines de simulation et d'application	- Coûteux - Utilisation limitée en BET	
ESP-r	- Flexibilité - Gratuit	- Manque de documentation - Peu utilisé en France	

Tableau 4 : Comparatif des logiciels de STD d'après (Darakdjian, 2017)

D'après ce tableau comparatif, il apparait dans un premier temps que les logiciels qui répondent au mieux aux objectifs de notre étude sont : Energy Plus + Design Builder et Pleiades + Comfie. Energy Plus présente en effet plusieurs avantages notamment, la convivialité de l'interface (en utilisant Design Builder), la facilité d'importation et d'exportation et sa flexibilité. Pour ce qui est de Pleiades + Comfie, son avantage dans le cadre de notre étude est sa large utilisation en France, en plus de son interface facile d'usage. Il a aussi l'avantage d'avoir un module qui traite du comportement des occupants. Les logiciels comme Dymola, ESP-r et TRNSYS, présentent des limitations qui ne conviennent pas à notre étude, comme le coût, le manque d'utilisation en France ou dans le bâtiment en général.

3.3 *Évaluation de l'impact du changement de comportement par STD*

Un autre volet important à investiguer est l'enjeu de changer le comportement énergétique dans le bâtiment. Ce volet trouve son importance dans le contexte actuel où il est utile de quantifier les gains en énergie dus au changement de comportement des occupants d'abord pour les sensibiliser et ensuite pour orienter les efforts vers ce genre de mesures.

Dans les bâtiments bureaux, l'impact du comportement des occupants réside principalement dans l'utilisation des systèmes de contrôle, l'ouverture et la fermeture des fenêtres et des occultations et l'usage de l'électricité spécifique. Dans les bâtiments résidentiels, en plus de cela s'ajoutent des activités variées comme la cuisine par exemple qui dépendent des occupants et leurs statuts (femme au foyer, couple retraité, etc.) (Hong et al., 2017). Les forces qui conduisent à des comportements induisant des consommations énergétiques sont pour (Fabi et al., 2012) :

- L'environnement physique représenté par les paramètres physiques dans lesquelles se retrouve l'occupant comme la température et l'humidité.
- Les facteurs contextuels liés au bâtiment, son architecture, son enveloppe, etc.

- Les facteurs psychologiques : il s'agit des facteurs liés à la psychologie de l'occupant comme l'âge, le niveau de santé, la culture, …
- Les facteurs sociaux : il s'agit ici des facteurs dictés par l'interaction des occupants entre eux et les relations qui les lient ainsi que de l'organisation de ces relations. Dans le cas du bâtiment résidentiel par exemple, les consignes de chauffage dépendent de la personne qui a la responsabilité familiale de les définir.

Dans cette partie, nous analysons les travaux qui se sont intéressés à quantifier l'impact du changement de certains paramètres notamment le comportement des occupants sur la réduction ou l'augmentation de la consommation énergétique dans les bâtiments à travers des simulations thermiques dynamiques.

Dans (Pan et al., 2017), une simulation thermique dynamique est utilisée afin d'estimer l'impact d'écogestes liés à l'usage du chauffage : ne pas ouvrir les fenêtres avec le chauffage et réduire la consigne de chauffage. (Wilde et al., 2013) se sont intéressés à davantage de postes de consommation dans le résidentiel en comparant deux stratégies, celle liée au comportement (ouverture portes/fenêtres, consignes de chauffage, éteindre les lumières, utilisation des appareils) et celle liée à la rénovation (isolation, double vitrage, système de chauffage efficace énergétiquement, contrôle éclairage). Dans (Wei et al., 2015), trois scénarios liés aux ouvertures et fermetures des fenêtres sont comparés afin de déterminer l'impact des préférences des occupants sur leurs actions et donc sur les consommations d'énergie. (Wang and Greenberg, 2015) mesurent l'impact des actions sur l'ouverture et la fermeture de fenêtres sur le confort au sein du bâtiment et sur les consommations énergétiques. (Lopes et al., 2017) évaluent l'impact de deux comportements différents, l'un énergivore et l'autre économe par rapport à un comportement de référence pour plusieurs profils de consommation dans le cadre de maisons. (Karjalainen, 2016) compare aussi trois types de comportements mais dans les bâtiments de bureaux : l'un insoucieux (éclairage et ordinateur toujours allumés), l'autre normal (valorisation de l'éclairage naturel, lumières éteintes après les heures de travail) et le dernier conscient (éclairage éteint en cas de non-présence). Le même travail est effectué dans (Ben and Steemers, 2020) dans le secteur résidentiel sur cinq archétypes définis préalablement en simulant les différences de consommations entres eux en cas de rénovation énergétique. Des modèles plus globaux intégrant un changement de comportement sur plusieurs systèmes sont présentés dans (Sun and Hong, 2017) et (He et al., 2021) afin d'estimer à travers des simulations thermiques dynamiques l'impact de chaque écogeste sur la réduction des consommations d'énergie et l'impact global de tous les écogestes regroupés dans les bureaux. Une autre approche pour estimer l'impact du comportement des occupants a été adoptée dans (Ascione et al., 2020) où un cas de base a été comparé avec une consommation excessive d'énergie de la part des occupants. Cette étude a montré que le comportement des occupants peut conduire à des consommations importantes d'énergie qui peuvent même annuler les gains possibles par les travaux de rénovation énergétique.

Après avoir présenté dans ce qui précède les outils permettant de mesurer le comportement énergétique, les méthodes pour le modéliser et les initiatives pour évaluer son impact sur les consommations d'énergie. Il est judicieux de se tourner dans une seconde partie de ce travail vers les moyens de changer le comportement énergétique et parvenir à faire des occupants des bâtiments des usagers responsables.

L'objectif de notre approche est de se tourner vers d'autres disciplines capables de fournir des outils de changement de comportement afin de cerner de façon plus globale les solutions orientées vers l'occupant. D'après (Morris and Oliveira, 2019), l'usage des équipements électriques a beaucoup plus d'impact sur les consommations électriques que la classe de performance énergétique des dits équipements. Une application rappelant aux usagers de

fermer les stores peut être plus efficace que des systèmes intelligents de gestion des systèmes d'occultations (Sun and Hong, 2017).

Si les travaux d'ingénierie permettent de calculer les consommations et prendre les mesures nécessaires par la suite à travers des systèmes de gestion d'énergie, les sciences sociales quant à elles cherchent à expliquer les raisons derrière certains comportements d'utilisation de l'énergie (Stern, 2017). Cependant, les facteurs dictant le comportement qui sont étudiés dans le cadre des sciences sociales sont négligés dans le cadre des études liées à l'ingénierie et la simulation des consommations des bâtiments (Du and Pan, 2021). C'est pourquoi il est nécessaire d'adopter une approche pluridisciplinaire qui combinerait les avancées technologiques et les travaux sociologiques traitant du comportement humain (Guerassimoff and Thomas, 2015 ; Paone and Bacher, 2018, Delzendeh et al., 2017).

Dans ce qui suit nous nous intéressons à la vision comportementale de la consommation d'énergie à travers les théories de comportement et les solutions proposées par l'économie comportementale comme les nudges par exemple.

4 *Théories du comportement*

D'un point de vue général, le comportement a été traité par plusieurs disciplines avec différentes approches, chacune plaçant l'individu dans un contexte permettant d'étudier de manière plus pertinente son comportement. Économie, sociologie, psychosociologie, anthropologie, psychologie en particulier se sont longuement intéressées à comprendre les mécanismes derrière le comportement humain en le considérant d'un point de vue individuel, de groupes ou collectif (Kriechbaumer and Jacobsen, 2018). Ceci est intéressant dans le sens où ça permet de déduire les incitations les plus influentes à partir de l'analyse des déterminants du comportement.
Nous nous sommes basés sur les travaux de (Martin and Gaspard, 2017) afin de dresser le schéma ci-dessous résumant l'étude du comportement par les différentes sciences humaines et sociales avec une proposition d'incitations de changement de comportement suivant chaque approche (**Figure 20**).

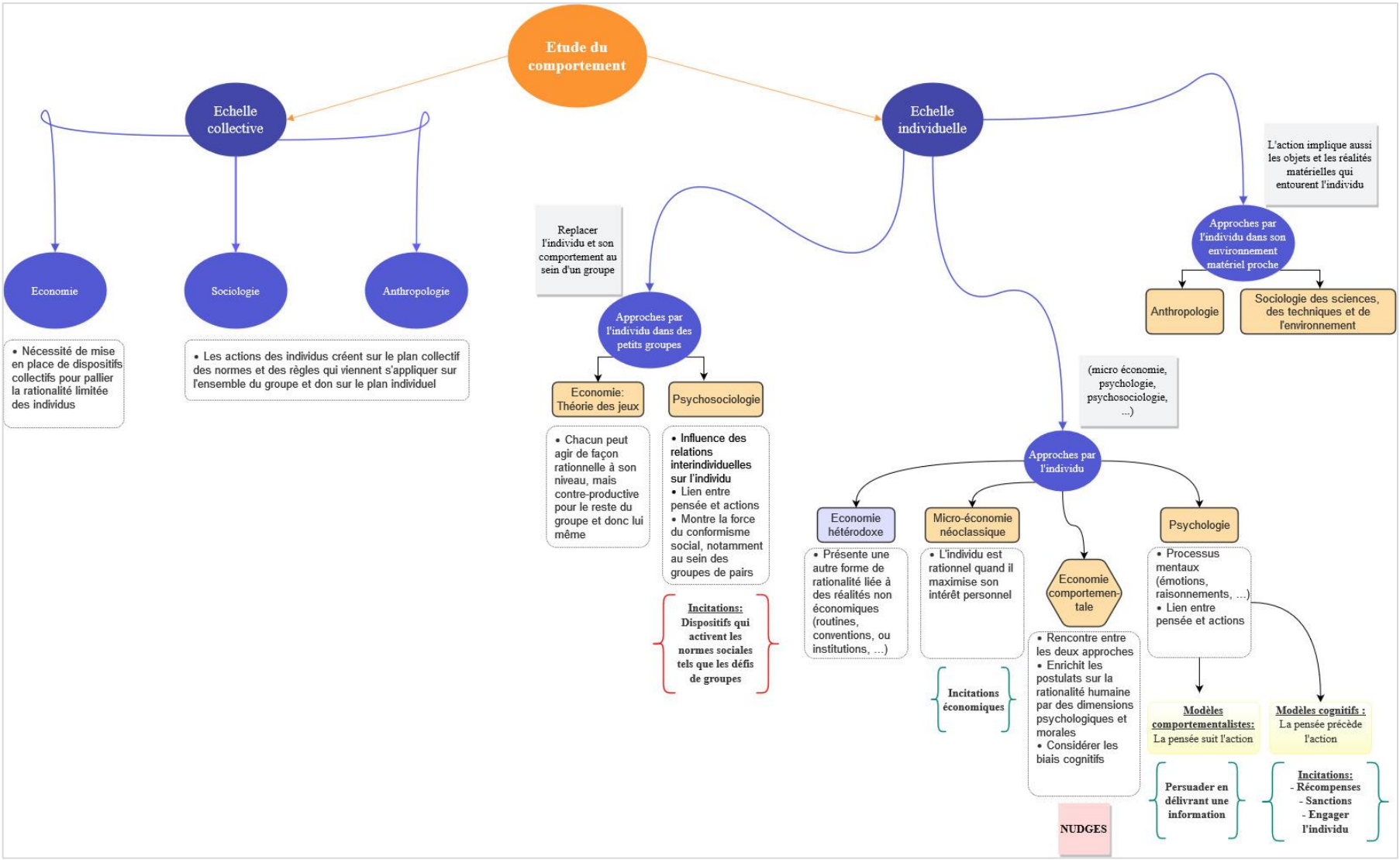


Figure 20: Résumé des disciplines des sciences humaines et sociales qui traitent du comportement des occupants
Source : Auteur (inspiré des travaux de (Martin and Gaspard, 2017))

Comme l'objectif de notre travail est de changer les comportements afin d'atteindre un comportement permettant de réduire les consommations d'énergie, nous nous intéresserons dans ce qui suit au comportement pro-environnemental en particulier.

Le comportement pro-environnemental est défini comme un comportement visant à réduire de façon intentionnelle l'impact des actions humaines sur l'environnement. Il peut se présenter sous forme directe (éco-gestes) dans le cas où il impacte directement l'environnement mais aussi sous forme indirecte à travers la mise en place d'un contexte encourageant la protection de l'environnement (politique, suggestions, informations) (Stern, 2000). Comprendre les motivations et les facteurs dictant un comportement pro-environnemental permet de mieux contrôler le comportement énergétique des occupants (Yan et al., 2017). Il permet aussi de dépasser l'écart entre intentions et actions surtout dans le cas de consommateurs conscients mais qui rencontrent des difficultés à passer à l'action et adopter les bons éco-gestes. D'après une enquête menée par l'Eurobaromètre[26], 95 % des européens jugent qu'il est important de protéger l'environnement mais cela ne garantit pas qu'ils le fassent.

Nous avons parcouru les travaux de recherche qui se sont intéressés à l'utilisation des théories et modèles comportementaux pour comprendre le comportement des occupants dans le bâtiment. Ces travaux se basent sur les éléments constitutifs de chaque théorie pour en déduire un facteur d'étude des interactions de l'occupant avec les différents systèmes du bâtiment : système CVC, ouverture et fermeture des fenêtres, système de ventilation, éclairage et occultants, usage des équipements électriques, système ECS. L'analyse de ces différents travaux, en plus de l'étude de revues de littératures traitant du même sujet, nous a permis de dresser une classification de ces théories et modèles comportementaux (Horta et al., 2014, Heydarian et al., 2020). Trois branches essentielles sont donc concernées : les approches économiques, psychologiques et sociologiques. Les théories et modèles économiques fournissent des explications sur la consommation de l'énergie aux niveaux micro et macro en tirant parti de la vaste littérature développée pour d'autres marchés. Basées sur des approches économiques, ces théories traitent de la rationalité de la prise de décision économique.
Les approches issues de la psychologie sociale et environnementale discutent de manière exhaustive des facteurs influençant le comportement humain. Elles s'intéressent aux processus de prise de décision des individus à la lumière de leurs attitudes, connaissances, habitudes, préoccupations économiques, entre autres. Les approches sociologiques, quant à elles, considèrent que dans le contexte de l'utilisation de l'énergie, les individus ne sont pas des décideurs autonomes, mais leurs décisions sont plutôt motivées par des facteurs sociaux et technologiques ainsi que par des interactions. Elles traitent de la perception commune et/ou de l'éducation liées à la consommation d'énergie. Nous résumons dans le **Tableau 5** ci-dessous cette classification avec des exemples des travaux qui se sont basés sur ces différentes théories dans l'étude du comportement des occupants dans le bâtiment notamment dans le cadre de leurs interactions avec les différents systèmes cités plus haut :

Domaine	Théories	Application
Psychologie	- Théorie de l'action raisonnée (TAR) (Theory of reasoned action)	- Usage des systèmes CVC (Ding et al., 2019) - Éclairage et usage des équipements électriques (Lo et al., 2014a) - Ouverture des fenêtres et usage des systèmes d'occultation (Lee and Malkawi, 2014b) - Système ECS (Fielding et al., 2012)

[26] Enquête réalisée en 2020
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_20_331

	- Théorie du comportement planifié (TCP) (Ajzen, 1985)	- Systèmes d'éclairage et occultation (Lo et al., 2014b) - Tous les systèmes (Guerreiro et al., 2015) (Gao et al., 2017) (Dixon et al., 2015) (Octav-Ionut, 2015) (Obaidellah et al., 2019a) (Chen et al., 2017) (Nie et al., 2019)
	- Théorie du comportement interpersonnel (Triandis, 1979)	- Tous les systèmes (Zierler et al., 2017)
	- Théorie Valeur – Croyance – Norme (VCN) (Value, Belief, Norm Theory) (Stern et al., 1999)	- Tous les systèmes (van der Werff and Steg, 2016) (Azar and Al Ansari, 2017)
	- Modèle d'activation des normes (MAN) (Schwartz, 1997 ; Schwartz & Howard, 1981).	- Tous les systèmes (Zhang et al., 2013)
Sociologie	- Théorie des pratiques sociales (TPS) (social practice theory) (Reckwitz, 2002)	- Tous les systèmes (Hess et al., 2018)
	- Théorie des réseaux sociaux (TRS) (social network theory).	- Tous les systèmes (Chiu et al., 2014)
Économie	- Théorie des choix rationnels (Elster, 1986)	
	- Utility theory (Thaler, 2008)	
	- Économie comportementale	(Becker, 1993) (Abrahamse et al., 2005)
	- Théorie des jeux	- Tous les systèmes (Konstantakopoulos et al., 2019a)
	- Modèles de choix discrets	(Konstantakopoulos et al., 2019b)

Tableau 5 : Théories du comportement pro-environnemental selon les domaines

Parmi ces théories, nous avons choisi de nous inspirer de la TCP, de la VCN et de la TCI. D'abord parce qu'elles sont très utilisées dans les travaux qui étudient l'impact du comportement sur les consommations énergétiques du bâtiment, mais aussi parce qu'elles englobent des facteurs qui s'alignent avec nos objectifs de recherche. Nous présentons ces théories ci-dessous :

4.1 *Théorie de l'action raisonnée (TAR) / Théorie du comportement planifié (TCP)*

La TAR (**Tableau 5**) est une théorie qui a introduit en 1975 un nouvel élément dans la compréhension de l'adoption des comportements, à savoir l'intention. L'adoption du comportement dépend de l'intention de l'individu à l'adopter et résulte des facteurs suivants :

- **L'attitude** liée à la perception de l'individu envers certains comportements. Dans le cas du comportement pro-environnemental par exemple, l'attitude est étudiée suivant le

ressenti lié au comportement pro-environnemental. S'il est pénible, plaisant, fatiguant, contraignant ou s'il réduit la liberté et le confort de l'individu, etc.
- **La norme subjective** définie par la perception de l'individu des attentes des personnes qui comptent le plus pour lui en ce qui concerne ses comportements. Elle se base sur la motivation de l'individu à se conformer aux souhaits de ses référents[27].

La TCP (**Tableau 5**) est une extension de la TAR. Elle a été développée pour explorer et prédire les comportements sociaux et humains dans les secteurs de la santé, de l'éducation et des technologies de l'information (TI). Le nouveau facteur qui caractérise la TCP par rapport à la TAR dans la définition de l'intention d'adoption du comportement est :

- **Le contrôle comportemental perçu** concerne la vision de l'individu envers lui-même et sa capacité à adopter certains comportements. Croit-il être capable d'agir en faveur de l'environnement et disposer des moyens nécessaires pour le faire ?

Dans la littérature, la TCP a été utilisée pour étudier les comportements économes en énergie, la volonté d'adopter des actions d'économie d'énergie dans les ménages et les intentions d'achat de produits respectueux de l'environnement. Un facteur central de la TCP est l'intention de l'individu d'adopter un comportement donné. Elle affirme que le comportement est une fonction directe de l'intention comportementale. (Wang et al., 2021) utilisent la TCP afin de prédire les intentions des visiteurs d'hôtels dans la réduction des consommations d'énergie. Les travaux de (Chen and Gou, 2022) ont montré à leur tour que l'utilisation de la TCP dans le cadre d'une résidence d'étudiants permet de comprendre le comportement de occupants et donc d'établir un programme visant la réduction des consommations d'énergie de la part des occupants.

4.2 *Valeurs – Croyances - Normes (VCN)*

La théorie VCN s'intéresse spécifiquement au comportement durable. D'après cette théorie, le choix d'un comportement durable peut être le résultat d'une obligation perçue d'agir de manière écologique. Elle explique le comportement pro-environnemental comme comportement altruiste. Elle se base sur :

- **La conscience de conséquences.**
- **L'attribution de la responsabilité.**
- **Les normes morales personnelles**.

Compte tenu de sa conception en tant que modèle d'explication du comportement durable, la théorie VCN a été largement adoptée dans divers domaines de la durabilité Bal et al., 2021).

4.3 *Théorie du comportement interpersonnel (TCI)*

La théorie du comportement interpersonnel (Theory of interpersonal behaviour) (Triandis, 1979) présente de nombreuses similitudes avec la théorie du comportement planifié. Les deux théories clament que les intentions délibérées pour adopter un comportement sont tributaires de plusieurs paramètres notamment les croyances et le regard externe qui représente une norme sociale. Cependant, à la différence de la TCI, la TCP ne considère que les intentions conscientes des individus. La TCI par exemple tient compte de la composante "habitude" qui

[27] On entend par référents ici un groupe de personnes qui sont proches de l'individu, par exemple, la famille, les pairs, le conjoint, les amis proches, les enseignants et toute personne considérée comme importante dans la vie de l'individu.

engendre des comportements basés sur la familiarité et la répétition plutôt que sur une prise de décision consciente Tetlow et al., 2015). Il en est de même des émotions qui peuvent représenter un facteur impulsif à l'origine du comportement. Une autre différence est que la TCP se penche plus sur le contrôle perçu de l'individu sur son comportement, alors que la TCI considère plus les facteurs environnementaux qui facilitent l'adoption du comportement en question.

4.4 *Récapitulatif*

Nous résumons dans la **Figure 21** ci-dessous les facteurs qui constituent chaque théorie :

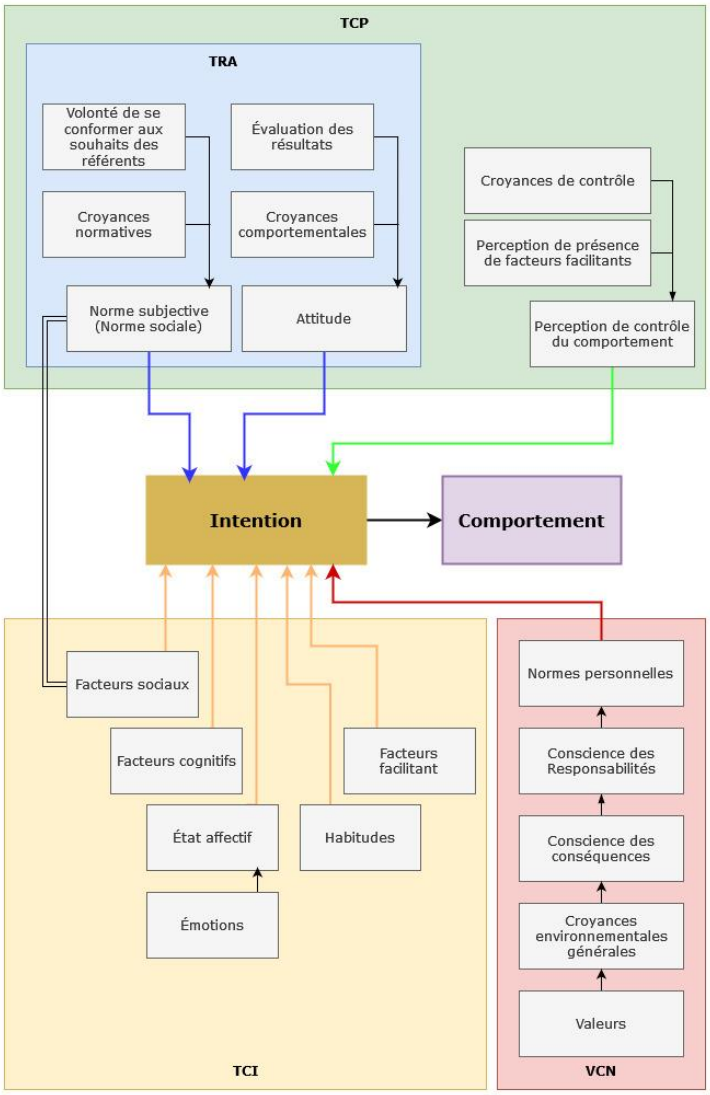


Figure 21 : Schéma résumant les théories TCP, TRA, TCI et VCN

En plus de ces facteurs liés aux théories du comportement, nous avons parcouru la littérature afin d'identifier les autres facteurs abordés lors de l'étude du comportement pro-environnemental.

5 *Facteurs dictant le comportement et le comportement pro-environnemental*

Le comportement des occupants en lien avec la consommation de l'énergie dépend de plusieurs facteurs comme les avancées technologiques, le développement économique et la culture d'un point de vue général. Au niveau individuel, il s'agit des caractéristiques humaines, l'âge, les normes, les connaissances et routines (Simanaviciene et al., 2015). La détermination des facteurs dictant le comportement peut se baser sur certaines des théories du comportement citées précédemment (TCP (Obaidellah et al., 2019b, Liu et al., 2020, Nie et al., 2019), VCN (Adams et al., 2021) par exemple) mais aussi sur d'autres facteurs. Les travaux entrepris dans la sociologie de l'énergie de (Zélem, 2010) ont essayé d'intégrer des facteurs liés au volet humain et sa relation avec son environnement dans l'explication des consommations énergétiques aux delà des critères démographiques. Les travaux de (Belaïd et al., 2019) montrent eux aussi que les facteurs géographiques et socio-économiques jouent un rôle important quant à la demande énergétique des ménages français et que leur connaissance pourrait aider les décideurs politiques à définir les mesures nécessaires à prendre afin de réduire cette demande.

Au lieu de se concentrer sur des solutions technologiques, les politiques peuvent s'orienter vers l'occupant et son comportement. Dans leur étude de l'usage de l'énergie dans le secteur résidentiel, (Belaïd and Joumni, 2020) classent les facteurs qui dictent un comportement pro-environnemental comme suit:

- Facteurs individuels (idées reçues, expérience accumulée et habitudes développées dans le logement),
- Facteurs sociodémographiques,
- Facteurs idéologiques et situationnels,
- Facteurs liés aux solutions et obstacles de gestion de l'énergie.

Les travaux de (Kavousian et al., 2015) montrent une différence de 6 % de consommations entre le statut locataire et propriétaire du bâtiment. Ils montrent aussi que la présence d'un membre de famille avec un bon niveau d'études conduit à plus d'efficacité énergétique dans le ménage. (Yue et al., 2013) intègrent d'autres facteurs comme le niveau de connaissance sur la réduction des consommations énergétiques (connaissance du concept de consommation d'énergie, sensibilité aux questions énergétiques), la capacité d'agir (connaissance du comportement à adopter, présence d'obstacles), ainsi que les facteurs situationnels (normes sociales, publicité, récompenses et pénalités). (Martínez-Espiñeira et al., 2014) proposent une autre classification suivant des facteurs socio démographiques, les attitudes et croyances ainsi que la vision envers les politiques publiques. Les travaux de (Lazaric et al., 2020) démontrent l'impact des facteurs sociodémographiques comme le genre, l'âge et le niveau d'études sur la définition du comportement durable, mais aussi de facteurs liés aux valeurs environnementales et l'influence de l'environnement sociale.

Ces facteurs peuvent être classés en 3 types (Hwang et al., 2000) comme présenté dans le **Tableau 6** ci-dessous (Testa et al., 2016 ; Coulbaut-Lazzarini and Bailly, 2015) :

Les facteurs influençant le comportement pro-environnemental	**Description**
Les facteurs cognitifs	- La connaissance environnementale : intègre la connaissance des systèmes de gestion d'énergie et la connaissance liée aux actions.
Les facteurs affectifs	- Les variables d'attitude concernent les valeurs, les croyances environnementales et la sensibilité environnementale. - Les variables caractéristiques concernent la capacité de contrôle c'est-à-dire la croyance de l'individu sur l'impact de ses actions et la responsabilité environnementale c'est-à-dire à quel point il

	est responsable pour agir en faveur de l'environnement.
Les facteurs situationnels	- Les variables situationnelles ou de contextualisation liés aux attentes de la société, aux réglementations et à la sensibilisation. - Les données sociodémographiques.

Tableau 6 : Facteurs influençant le comportement pro-environnemental

La détermination de ces facteurs et leur évaluation au niveau des occupants par différentes méthodes permet de comprendre le comportement énergétique dans le bâtiment, de créer des profils de consommateurs et finalement de prédire l'adoption de certains comportements par les occupants.

6 *Profilage du comportement énergétique et des occupants*

Dans la littérature, on distingue plusieurs manières de créer des profils de consommateurs d'énergie dans les bâtiments. Cette distinction se base soit sur le type de moyen de collecte des données, le type des données exploitées ou les moyens de traitement de données pour la segmentation (**Figure 22**)

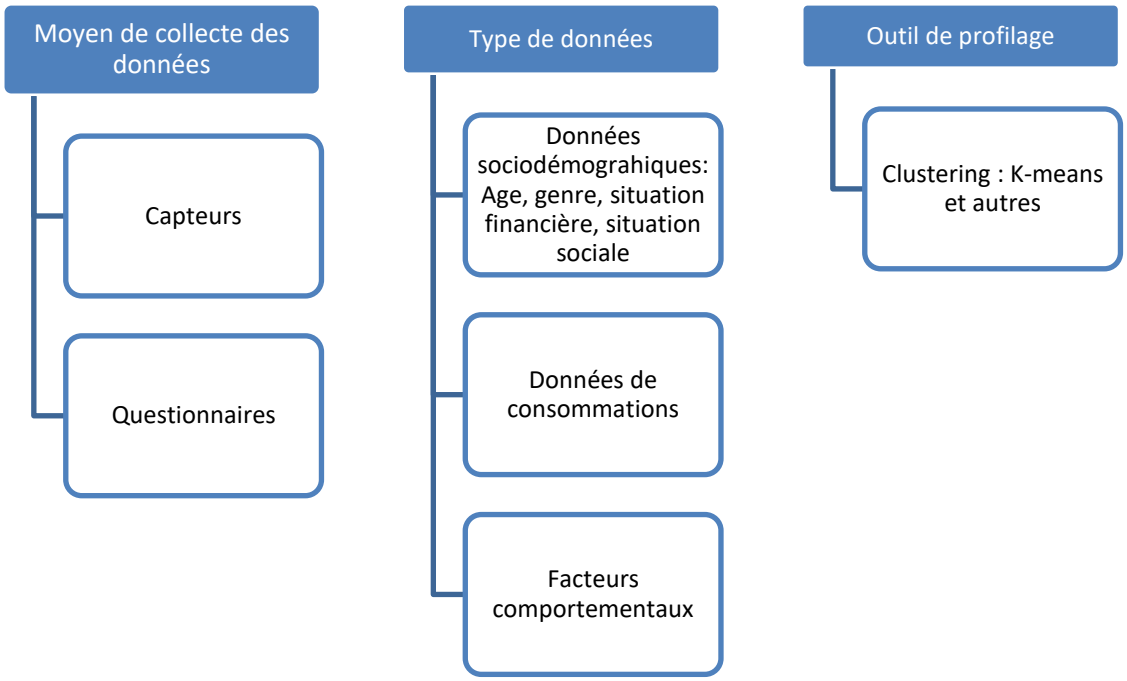


Figure 22 : Profilage des occupants dans les travaux de littérature

À travers une revue de littérature sur les interactions des occupants avec les systèmes du bâtiment d'un point de vue comportemental, (Heydarian et al., 2020b) dressent les conclusions suivantes : (1) les théories psychologiques sont plus utilisées que les facteurs économiques ou sociologiques ; (2) la théorie la plus utilisée est celle du comportement planifié ; (3) la plupart des méthodes se basent sur les questionnaires comme moyen de collecte de données.

Dans le **Tableau 7**, nous présentons, suivant la précédente distinction, quelques travaux de recherche qui portent sur la création de profils de consommateurs d'énergie et le comportement attendu des profils créés.

Nous jugeons, en nous basant sur les chapitres précédents et les constatations des résultats de recherches, que les critères sociodémographiques ne représentent pas une base suffisante pour l'établissement des profils qui définissent l'aptitude du consommateur à adopter un comportement en faveur de l'efficacité énergétique ou la sobriété énergétique dans le bâtiment. En effet, un profil qui a tendance à adopter le comportement énergétique approprié n'est pas obligatoirement de sexe féminin ou masculin, inscrit dans une tranche d'âge bien définie, ni avec des ressources financières spécifiques.

Le volet comportemental et les critères psychographiques qui étudient les motivations et les facteurs dictant le comportement représentent une base solide sur laquelle nous pouvons distinguer les individus et donc par conséquent les incitations à leur appliquer afin de changer leur comportement (Testa et al., 2016). Nous avons par ailleurs considéré qu'il était plus judicieux d'utiliser les facteurs sociodémographiques seulement pour décrire les profils que nous avons élaborés sur une base de facteurs comportementaux. Cette réflexion est soutenue par les travaux de (Sütterlin et al., 2011).

Parmi les travaux qui ont étudié la classification des individus suivant des critères de comportement, on retrouve ceux de (Zélem, 2018) qui distinguent à partir des résultats d'une enquête quatre profils sociologiques des occupants en matière d'usage de l'énergie dans le bâtiment :

- ***Les éco-sceptiques*** (très attachés à leur confort et très consommateurs peu importe leur niveau de vie),
- **Les *éco-essentiels*** (qui effectuent des économies d'énergie par souci financier, soit parce que leurs ressources financières sont limitées, soit parce qu'ils ne se permettent pas des dépenses inutiles),
- **Les *écoresponsables*, ou *consom'acteurs*** (qui ont fait le choix de la sobriété pour protéger l'environnement),
- **Les *technophiles*** (ce sont les individus qui savent et acceptent l'utilisation de la technologie dans le bâtiment. On distingue ceux qui utilisent plusieurs appareils électriques et donc génèrent plus de consommations et ceux qui utilisent la technologie pour le pilotage des consommations énergétiques au sein du bâtiment).

(Sütterlin et al., 2011) se sont basés sur un questionnaire dont les questions sont tirées des sciences comportementales afin de faire ressortir les croyances et les facteurs dictant le lien entre homme et comportement environnemental. Parmi les théories traitées, la VCN, le facteur financier et de confort sont aussi pris en considération. L'étude se base sur 17 critères qui concernent les actions de sobriété et d'efficacité énergétique, le type de motivation (financière, de confort, intrinsèque ou extrinsèque, le niveau de conscience environnementale et les croyances dictant les actions (conséquence des résultats, responsabilité individuelle, capacité de passer à l'action, etc.).

Le travail de (Brosch et al., 2014) se base sur la théorie du comportement planifié, la théorie VCN pour déterminer les corrélations entre les caractéristiques comportementales des dites théories et l'intention d'effectuer certains écogestes listés dans un questionnaire.

Auteurs	Taille de l'échantillon	Type de bâtiment	Outil de collecte de données				Données traitées	Méthodes de profilage	Profils générés
			Capteurs intelligents	Questionnaire	Factures d'électricité	Données artificielles (simulation)			
(Kwac et al., 2013)	85 bâtiments	Résidentiel	X				Données de consommation	Clustering K-means	- Profil avec niveau élevé de consommations d'énergie - Profil avec niveau faible de consommations d'énergie
(Viegas et al., 2016)	3 000 bâtiments	Résidentiel	X	X			Données de consommation, données sociodémographiques	Clustering K-means	- Quatre profils de consommations d'énergie différents
(Bourgeois et al., 2017)	1 950 bâtiments	Résidentiel		X			Systèmes de contrôle, adoption des éco-gestes, type d'équipements, fréquences d'utilisation des équipements		- Profil avec niveau élevé de consommations d'énergie - Profil avec niveau faible de consommations d'énergie
(Lévy and Belaïd, 2018)	Données INSEE-2006 31 000 ménages	Résidentiel		X			Données démographiques, sources d'énergie, âge		- 10 types de consommateurs basés sur les sources d'énergie et les niveaux de consommation (faible, élevé)
(Amiel, 2019)		Tertiaire - Bibliothèque				X	Données de consommation	Clustering K-means	- 5 profils de consommations différents
(Rafsanjani et al., 2020)	10 occupants		X				Données de consommation		- Occupants avec comportement positif - Occupants avec comportement négatif
(Ofetotse et al., 2021)	310 ménages	Résidentiel		X	X		Données démographiques, date de construction, caractéristiques des appareils, fréquences d'usage	Clustering K-means	- 4 profils basés sur la taille des logements, les consommations d'énergie, et le nombre d'équipements utilisés

Tableau 7 : Résumé des travaux de recherche existants dans le profilage des consommateurs d'énergie dans le bâtiment

7 *Vers un comportement pro-environnemental*

7.1 *Méthodes de changement de comportement*

Comme nous l'avons avancé dans les précédents chapitres, le comportement humain dépend de facteurs internes (croyances, valeurs, attitudes, émotions, etc.) et de facteurs externes (les réglementations, les normes sociales, les idéologies, etc.). Les solutions visant le changement doivent se baser sur ces facteurs. Une classification des solutions existantes est présentée par (Grilli and Curtis, 2019) :

1) Éducation ; cette méthode est plus effective quand les individus sont à l'avance motivés pour changer leurs comportements.
2) Sensibilisation et création des liens ; elle se différencie de la solution précédente par son approche de groupes sous forme de workshops et groupes de travail pour la sensibilisation.
3) Influence sociale ; (Abrahamse and Steg, 2013) dressent une revue de littérature de ce type de solutions.
4) Nudges et incitations comportementales (Charlier et al., 2018, Lazaric and Toumi, 2022)
5) Récompenses financières et non financières (Gandhi and Brager, 2016).

Il découle de cette classification que les méthodes les plus utilisées sont l'éducation et les incitations d'influence sociale (Ruokamo et al., 2022). La méthode la moins présente dans la littérature est celle des nudges au vu de leur découverte récente en tant que moyen de changement de comportement. Cependant, en termes de succès, les nudges représentent les solutions avec le plus de succès dans la littérature comparés aux informations et moyens éducatifs (Soomro et al., 2021). Les travaux sur les nudges dans le domaine de l'énergie sont les moins présents ce qui représente un domaine qui nécessite plus d'investigation (Grilli and Curtis, 2019).

Certaines de ces incitations sont rappelées par (Azizi et al., 2019) en plus de la restructuration de l'environnement en mettant à disposition les outils nécessaires pour avoir accès à l'information, la persuasion émotive (exemple : images), la coercition à travers des amendes par exemple et la restriction.

(Bastida et al., 2019) classent les solutions de changement de comportement suivant des facteurs qui permettent d'influencer le comportement à savoir :

- Les facteurs de motivation : qui émanent de moteurs internes et individuels comme la connaissance, la conscience, l'influence sociale, les capacités perçues et les intentions.
- Les facteurs de renforcement : il s'agit de facteurs liés aux conséquences des actions entreprises par les individus. On peut citer à titre d'exemple le feedback de consommations, les messages ciblées, les conseils ou autres.
- Les facteurs de facilitation : ils dépendent des contraintes externes qui dictent le comportement et qui peuvent faciliter l'adoption du comportement souhaité. Les paramètres par défaut peuvent représenter un exemple de ces facteurs.

Nous citons aussi (Casado-Mansilla et al., 2020) qui présentent les incitations les plus efficaces dans le contexte des bâtiments tertiaires où les occupants ne paient pas la facture énergétique :

- Les figures d'autorité.
- La causalité : en montrant de façon directe le lien entre les actions des individus et leurs répercussions.
- Le renforcement à travers la récompense.
- La validation externe par l'entourage proche de l'individu ou les personnes qui comptent pour lui.
- Les messages ciblés adaptés aux besoins et à la personnalité des individus.
- Le format du message ou de l'outil de persuasion.
- Les remerciements.
- Suivi personnel.
- La norme sociale : les comportements les plus répandus sont les plus appropriés.
- Reconnaissance publique.
- Suggestions.

À travers l'utilisation d'un questionnaire auprès d'occupants de bâtiments tertiaires, (Casado-Mansilla et al., 2020) montrent que les méthodes les plus efficaces sont: la causalité à travers des rappels de l'impact des comportements des individus, le suivi personnel et les récompenses. Il faut rappeler que ces solutions sont proposées dans le cadre de solutions basées sur les outils technologiques, vu que l'on distingue les solutions qui se présentent à travers des outils non technologiques comme les posters, les stickers, les affiches et les images et ceux faisant appel à des outils technologiques comme les systèmes basés sur les IdO, les jeux sérieux, etc. Nous développerons plus en détails ces solutions dans le cas des nudges (Soomro et al., 2021) dans la section suivante.

On trouve les solutions citées précédemment dans nombre d'autres travaux. Le site digitalwellbeing.org[28] regroupe une centaine d'incitations utilisées pour changer le comportement. Certaines d'entre elles sont classifiées sous la nomination de nudges représentant une approche offrant aux individus le choix, la liberté et la flexibilité. Les nudges se basent sur le fait que la réflexion humaine est liée à certains processus automatiques sur lesquels ils auront un impact significatif (OCDE, 2019).

Comme nous l'avons annoncé précédemment, les nudges représentent une méthode de changement de comportement peu couteuse qui a fait ses preuves (Hossain and Islam, 2019). Néanmoins les travaux dans la littérature les concernant sont moindres par rapport à d'autres méthodes surtout dans le domaine de l'énergie. Nous avons donc choisi de présenter cet outil de changement de comportement, la théorie sous-jacente, son impact sur les comportements et quelques exemples qui l'ont utilisé. Il représentera aussi le moyen adopté dans la démarche de notre étude.

[28] https://digitalwellbeing.org/nudge-psychology-all-93-behavior-change-techniques-listed-and-summarised-free-app/

7.2 *Les Nudges*

7.2.1 *De l'homo œconomicus aux nudges*

Pour pouvoir changer les comportements, il faut d'abord comprendre le processus de prise de décisions et les leviers qui orientent les choix humains. Des choix qui, d'après les sciences comportementales, ne sont pas toujours rationnels et peuvent être dus à des biais cognitifs que subit le cerveau humain. Ainsi, en agissant sur certains leviers d'influence puissants, il est possible de changer les comportements avec de simples coups de pouces appelés « Nudges » (Singler, 2015).

La théorie classique de la décision depuis Descartes jusqu'aux économistes classiques postule que l'être humain est un être rationnel, qui cherche le maximum de satisfaction et d'intérêt (« utilité » chez les économistes) lors de sa prise de décision et ce en étudiant les avantages et les inconvénients des choix qui lui sont proposés. C'est une théorie qui se base sur les capacités rationnelles de l'être humain qui est censé connaitre ses besoins et savoir comment les satisfaire sans subir aucune influence extérieure. Il est aussi capable de hiérarchiser ses préférences qui pour lui sont fixes et inchangeables.

L'économie comportementale, parue en 1974 avec Daniel Kahneman et Amos Tversky, a montré à travers plus de 40 ans d'expérimentations qui suivirent les travaux des deux professeurs, que les décisions humaines ne sont pas rationnelles. Le livre (Kahneman, 2011) avance que les décisions humaines se font à travers deux systèmes de réflexion parallèles et concurrents. Le premier qu'il appelle « Fast Thinking » est un système de décision automatique et non conscient que l'humain utilise sans faire attention et sans s'en rendre compte. Il l'utilise dans les gestes mécaniques du quotidien et dans les routines. Il est instantané et ne nécessite pas beaucoup d'effort, c'est pourquoi il est utilisé par le cerveau pour prendre des décisions rapides afin d'éviter de consommer de l'énergie et préserver les ressources attentionnelles. Ce système se base sur des logiques simplifiées, des raccourcis mentaux, des stéréotypes, sur la mémoire, les premières impressions ainsi que les liens de causalité qui apparaissent évidents. C'est pourquoi il commet des erreurs de précipitation malgré sa rapidité et son efficacité. Le deuxième système « Slow Thinking » est quant à lui lent et conscient. Il se base sur beaucoup de concentration et nécessite beaucoup d'efforts, c'est pourquoi il ne peut pas être utilisé pour une longue durée. Lors de la prise de décision, le « Slow Thinking » pèse le pour et le contre des différents choix afin de déterminer le plus approprié et qui offre le maximum d'utilité.

D'après l'économie comportementale, la plupart de nos décisions sont faites par le premier système de réflexion, le Fast Thinking. Ceci est dû au fait que notre corps essaie de minimiser au maximum les activités consommatrices d'énergie du corps et notamment l'attention et la concentration nécessaires à la prise de plusieurs décisions durant la journée.

L'irrationalité de nos décisions n'est tout de même pas une fatalité. Le livre (Ariely, 2010) explique comment cette irrationalité est prévisible et qu'elle repose sur des erreurs d'appréciation qu'on peut prédire, nommés « biais cognitifs ». L'idée serait donc de les connaitre et les comprendre afin de pouvoir les contourner et établir des stratégies capables de mener à un changement de comportement en faveur du bien commun. Dans leur ouvrage (Thaler and

Sunstein, 2009), définissent le consommateur au centre d'un système manipulateur constitué d'émotions d'affects et d'une touche d'incohérence guidée par la pression sociale. Ils énumèrent un ensemble de biais comportementaux catégorisés en maladresse intellectuelle, tentations pour des choses préjudiciables et comportements grégaires.

L'économie comportementale étudie les phénomènes comportementaux à une macro échelle par des enquêtes sur des segments de population concernées, par des études de terrain et par l'analyse de séries statistiques. Elle traite aussi des phénomènes à micro-échelle dans laquelle l'adoption de méthodes moins généralisables proche de l'économie expérimentale est adoptée.

Dans le concept de l'économie comportementale, les êtres humains sont soumis à des facteurs d'influence qui peuvent être cognitifs ou liés aux interactions psychosociales en relation avec le groupe. C'est ainsi qu'une catégorisation des facteurs influents révèle trois groupes : Les facteurs sociaux, les facteurs de situation et les facteurs personnels :

- **Les facteurs sociaux** : Ce type de facteurs émane d'une puissance sociale qui nous influence. Tout simplement c'est l'évaluation et l'importance qu'on donne à ce que les autres peuvent penser de nous et de nos actions. La force des groupes d'appartenance par exemple instaure un certain respect de règles de comportements que l'on doit respecter pour s'intégrer. Cela implique toutes les personnes avec qui nous entretenons des relations directes et avec qui nous avons des comportements quotidiens.

- **Les facteurs de situation** : Ils représentent l'ensemble des facteurs qui sont tributaires de l'environnement dans lequel nos décisions sont prises. Cela dit que nos comportements sont confrontés à des changements dans le temps et dans l'espace générés par la manière avec laquelle nous est présentée l'information.

- **Les facteurs personnels** : Ce sont des facteurs qui démontrent l'aspect irrationnel des individus. Ils sont étroitement liés à notre propre histoire, nos émotions et nos biais cognitifs.

C'est dans ce contexte que deux chercheurs américains, le juriste Cass Sunstein et l'économiste Richard Thaler, ont théorisé le concept de « nudge » (Thaler and Sunstein, 2009). Thaler et Sunstein l'ont défini comme « un aspect de l'architecture du choix qui modifie le comportement des gens d'une manière prévisible sans leur interdire aucune option ou modifier de manière significative leurs motivations économiques. » (Johnson et al., 2012). Une définition qui comporte deux caractéristiques du nudge ; d'abord son objectif qui est de modifier les comportements, ensuite la méthode suivie qui est de modifier le contexte dans lequel les agents font leurs choix, appelé architecture du choix.

C'est ainsi que par définition, le nudge se distingue des autres moyens d'incitation tels que l'obligation ou l'incitation financière par la liberté des choix. Thaler et Sunstein précisent que la caractéristique fondamentale d'un nudge est la facilité d'y résister, ce qui garantit la liberté des choix des agents. Ils le qualifient de « paternalisme libertarien ». Ils donnent comme simple exemple l'expérience de la cafétéria d'école qui a permis de faire augmenter de 25 % la consommation des aliments sains par rapport aux autres aliments en modifiant simplement

l'architecture de la file et ce en rendant l'accès aux aliments gras plus difficile que l'accès aux aliments sains (Singler, 2018).

(Grüne-Yanoff and Hertwig, 2016) définissent les critères ci-dessous pour pouvoir qualifier une incitation de Nudge :

- Il doit exploiter les limitations cognitives dans le choix délibératif de l'humain sans recourir à des incitations financières.
- Il ne doit pas modifier les décisions pour lesquelles les agents ont des préférences explicites mais celles auxquelles ils ne prêtent pas attention.
- Il doit conduire à un changement de comportement réversible. L'agent doit toujours avoir la possibilité d'agir différemment.

7.2.2 *Classification des nudges*

Il n'existe pas dans la littérature une classification exacte ou une liste complète des nudges. Nombreux travaux citent des interventions qui se ressemblent dans leur application mais qui portent des appellations différentes (Abanda and Byers, 2016, Griessinger, 2019, Andor and Fels, 2018, Weinmann et al., 2016, Lehner et al., 2016, Hossain and Islam, 2019). Les incitations qualifiées de nudges respectent les conditions citées précédemment et varient suivant les objectifs de l'étude et les individus ciblés.

Dans le cadre des comportements pro-environnementaux par exemple, la notion de Green Nudge vient en avant d'une nouvelle méthode pour induire une évolution durable des habitudes de consommation. Le terme Green Nudge désigne alors les coups de pouces à portée environnementale appliquée à l'écologie. Les nudges verts jouent le rôle d'incitateurs des citoyens à adopter des modes de vie plus respectueux de l'environnement. Selon (Singler, 2015), l'extension des nudges au champ de l'écologie semble prometteuse, d'autant plus que les facteurs psychologiques sur lesquels les nudges s'appuient, au premier rang desquels la comparaison sociale et l'inertie face au changement, sont particulièrement importants en matière environnementale. La revue de littérature réalisée par (Wee et al., 2021) atteste de ce constat et rappelle les résultats positifs de l'usage des nudges dans le comportement pro-environnemental.

Si l'on se place dans le contexte particulier de l'usage de l'énergie dans le bâtiment, les nudges sont utilisés afin d'amener l'occupant à réduire ses consommations d'énergie. Certains nudges se présentent sous la forme de solutions technologiques. Nous pouvons citer :

- Les jeux sérieux ou ludiques : il s'agit d'un espace interactif fixant un objectif de réduction d'énergie dans le bâtiment. Ils ont l'avantage d'être amusants et d'attirer l'attention des utilisateurs.
- L'éco-feedback : il se base sur l'envoi d'informations concernant les anciennes et actuelles consommations des occupants.

- Interaction sociale ou ce qu'on peut aussi appeler la comparaison sociale ou norme descriptive : elle se base sur une classification des consommations de l'occupant par rapport aux autres occupants.
- Les systèmes IoD.
- Les systèmes de recommandation (Pal et al., 2019).

(Paone and Bacher, 2018) dressent une revue de littérature de ces solutions et montrent que l'éco-feedback s'avère très efficace dans le changement de comportement des occupants. Nous établissons à travers l'investigation des travaux de littérature et les besoins de notre étude la classification suivante (**Tableau 8**) où nous présentons les nudges les plus utilisés, les travaux qui les utilisent tout en précisant si des outils technologiques ont été intégrés ou non. À travers ce travail d'état de l'art sur l'utilisation des nudges dans la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment, nous tirons les constatations suivantes nécessaires à notre approche :

- Le concept de nudges est encouragé pour être utilisé dans les politiques publiques notamment en France (La Fabrique Ecologique, 2016).
- Bien que le nudge fasse face à des critiques éthiques liées au paternalisme et à la manipulation, les principales objections éthiques peuvent être dépassées dans le cas de la réduction des consommations énergétiques (Kasperbauer, 2017).
- Les nudges ont été beaucoup plus utilisés dans des travaux qui concernent les bâtiments résidentiels que les bâtiments tertiaires. Le nudge le plus utilisé dans le cadre des bâtiments résidentiels est celui de comparaison. Dans le cadre des bâtiments résidentiels deux problématiques se présentent : le manque d'incitations financières car les occupants ne paient pas la facture énergétique ; et la difficulté de gérer un nombre important d'occupants.
- Les travaux se concentrent généralement sur l'utilisation d'un seul type de nudges, ou le cas échéant étudient l'impact de la totalité des nudges sans comparaison entre leurs impacts respectifs (Simanaviciene et al., 2015).
- La nécessité de prendre en considération le problème de la durabilité de l'effet des Nudges.
- L'effet de débordement des nudges est aussi intéressant à étudier. Les travaux de (Agarwal et al., 2017) ont montré que les enfants arrivent à changer le comportement de leurs parents à la maison à partir de la sensibilisation qu'ils reçoivent à l'école.

Source				(Kane and Srinivas, 2014)	(Gillingham and Tsvetanov, 2018)	(Henkel et al., 2019)	(Klege et al., 2022)	(Ruokamo et al., 2022)
Objectifs				Réduire les consommations d'énergie	Participation à un programme de réduction des consommations d'énergie	Adopter un comportement pro-environnemental	Réduire la consommation d'électricité	Réduire les consommations d'énergie
Outils technologiques						X	X	X
Type de bâtiments					Résidentiel		Bureaux	Résidentiel
NUDGES	Information	Nudge par défaut				X		
		Tips ; Astuces ; Conseil						X
		Rappels ; Stickers ; Posters				X		
		Nudges cognitifs	Permettent de procurer à l'usager l'information de façon plus perceptible à travers des analogies					
		Rétroaction - Feedback	Suivi du comportement des occupants et son impact	X			X	
	Norme sociale	Support social	Encouragements, reconnaissance, responsabilisation				X	
		Norme sociale injonctive	Le comportement le plus adéquat est celui adopté par la plupart des personnes ou validé par les personnes proches		X			
		Norme descriptive – Rétroaction comparative	Comparaison du comportement de l'agent avec d'autres personnes				X	X
	Norme morale	Appel moral	Rappel moral de l'impact du comportement sur l'environnement					

Tableau 8 : Classification des nudges liés à l'énergie dans la littérature avec des exemples de travaux

8 *Conclusion du chapitre*

Nous avions débuté ce chapitre en évoquant les disciplines qui s'intéressent à l'étude du comportement afin d'avoir une idée globale sur le comportement énergétique dans le bâtiment. Cela, a permis de relever plusieurs points de questionnement. La suite du chapitre a donc été l'occasion de dresser un large inventaire des travaux existants et qui concernent : la mesure du comportement, la modélisation du comportement et l'intégration des modèles de comportements dans la simulation thermique dynamique.
L'occupant impacte le bâtiment à travers diverses interactions directes et indirectes et peut donc notamment conduire à plus ou moins de consommations d'énergie. Les actions de l'occupant concernent essentiellement les consignes de chauffage, les ouvrants, les occultations et les systèmes d'éclairage. Une bonne modélisation de comportement de l'occupant dans les simulations thermiques dynamiques permet de dépasser l'écart entre les consommations prédites durant la phase de conception, et les consommations réelles du bâtiment.

Ce chapitre a été l'occasion de présenter les méthodes de modélisation de comportement avec un comparatif des outils de simulation thermique dynamique. L'importance d'une approche pluridisciplinaire a aussi été soulignée, ce qui a impliqué une présentation du comportement énergétique du point de vue des théories sociales et comportementales. L'objectif étant d'améliorer le comportement des occupants dans le bâtiment afin qu'il se tourne vers un comportement pro-environnemental, nous avons présenté les outils de changement de comportement et en particulier les nudges avec leurs différents types. Les nudges permettent de changer le comportement des occupants en agissant sur l'architecture de l'environnement qui les entoure à travers : l'information, le feedback, les normes personnelles et sociales ou la comparaison. Ils peuvent être présentés sous format papier ou à travers des applications, des technologies ou des plateformes dédiées. Les travaux de cette thèse représentent la continuité des travaux de (Charlier et al., 2018) qui visent à investiguer l'impact de l'utilisation des nudges dans la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.

Ce travail de revue de littérature nous a permis de :

- Définir les outils de collecte de données qui permettent de mesurer le comportement des occupants dans le bâtiment. Nous utiliserons dans le cadre de notre étude le questionnaire et les capteurs pour mesurer le comportement.
- Comprendre le rôle de la simulation thermique dynamique dans l'estimation des consommations du bâtiment et des gains en énergie dus à un changement de comportement.
- Déterminer les points d'amélioration à apporter dans les études liées à l'estimation du potentiel de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment à travers la simulation thermique dynamique suite à un changement de comportement.
- Recenser les modèles de comportement des occupants à intégrer dans la simulation thermique dynamique.
- Choisir le logiciel de simulation thermique dynamique à utiliser dans le cadre de notre étude.
- Déterminer les facteurs sur lesquels se base une étude comportementale de profilage des occupants utilisateurs d'énergie ce qui nous permet de développer notre propre framework basé sur des théories comportementales.

- Classifier les différents nudges utilisés dans les travaux de recherche dans le cadre d'un objectif de réduction de consommations énergétiques dans le bâtiment afin de pouvoir les utiliser dans le cadre de notre étude.

L'objet des deux prochains chapitres est une suite logique à ce travail théorique indispensable. Le premier consiste à simuler l'impact énergétique de l'application des écogestes dans le bâtiment en utilisant un outil de simulation thermique dynamique Pleiades – Comfie. Le deuxième s'intéresse à la mise en place d'une expérimentation basée sur l'utilisation des nudges et l'estimation des gains en énergies suite à leur application. Ces deux chapitres sont complémentaires et s'inscrivent dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire pour la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment à travers ses occupants.

CHAPITRE III : Simulation thermique dynamique de l'impact des écogestes dans le bâtiment

1 *Introduction*

Les enjeux du changement du comportement énergétique dans les bâtiments sont maintenant bien explicites. Un programme ambitieux de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment basé sur le potentiel de changement de comportement de ses occupants apparaît prometteur, d'autant plus dans le contexte actuel appelant à la sobriété énergétique. Cependant ce dernier nécessite une approche globale permettant l'identification des besoins, une proposition de solutions et une quantification de leur impact (Su et al., 2022). D'après la revue de littérature établie précédemment, nous avons tiré les conclusions suivantes sur lesquelles nous nous nous sommes basés pour élaborer notre étude :

- La nécessité de prendre en considération les méthodes stochastiques dans la simulation du comportement des occupants dans le bâtiment afin de déterminer ses consommations.
- La nécessité de considérer les facteurs qui dictent le comportement (Wee et al., 2021).
- La nécessité de prendre en compte les différences de comportement entre les occupants et leur impact sur les variations de consommation pour la totalité du bâtiment.
- La nécessité de combiner plusieurs nudges pour accroitre le changement Charlier et al., 2018)
- Dans les perspectives de leurs travaux, (Chouikh, 2013) (Soomro et al., 2021), proposent d'investiguer les gains d'énergie possibles suite à un changement de comportement dans le bâtiment dû à l'application des incitations comme les nudges.

Nous proposons dans le cadre de notre approche des améliorations permettant de dépasser ces limitations à travers les éléments suivants :

- Une collecte de données basée à la fois sur un questionnaire et sur des données issues de capteurs. Cette double collecte permet de combiner les avantages d'une collecte par capteurs avec une collecte par questionnaire. Plus d'informations peuvent être obtenues en utilisant le questionnaire et les données de capteurs. Cela permettra de mieux comprendre le comportement des occupants dans le bâtiment étudié (Bin, 2012).
- Détermination de quatre niveaux de comportements avec une probabilité de leur occurrence basée sur la collecte de données par questionnaire.
- Quantification du changement de comportements par variation de niveaux de comportements chez les occupants. La particularité de notre travail est qu'il s'éloigne de la vision extrême d'adoption des écogestes qu'on retrouve dans la littérature. D'abord parce qu'il ne compare pas uniquement deux types de comportements : efficace et non efficace comme dans d'autres travaux (cf. Partie 3.3 du Chapitre II). Mais aussi parce qu'il étudie par pourcentage l'impact de plusieurs niveaux de comportements dans le même bâtiment.

Dans le chapitre IV, lié à l'étude expérimentale du changement de comportement et qui va suivre, nous apportons les améliorations suivantes :

- Création d'un nouveau cadre de travail basé sur les théories du comportement et influencé par d'autres travaux afin d'évaluer l'intention des occupants à adopter un comportement pro-environnemental.

- Profilage des occupants suivant leurs intentions de changer leur comportement. Ceci est une base essentielle pour déterminer le niveau d'efforts et d'interventions à prodiguer aux occupants. Cette nouveauté dans notre travail permet de quantifier de façon plus réelle l'efficacité des nudges en tenant compte de la disparité des individus et de leurs différentes intentions.
- Une variété de nudges testés tenant compte des préférences des occupants.
- Expérimentation réelle de l'impact des nudges sur les différents profils étudiés et comparaison avec les données de simulation.

Nous nous positionnons dans la cadre de notre étude dans le cas des bâtiments tertiaires. Ce choix émane d'abord par la volonté de présenter une approche qui réponde aux questions liées au contexte actuel notamment les objectifs du décret tertiaire visant à réduire les consommations des bâtiments tertiaires à travers, entre autres, l'implication de ses occupants. Ensuite, le nombre faible d'études des bâtiments tertiaires et notamment de bureaux par rapport à celles dans le résidentiel. Et finalement, la moindre importance des contraintes financières dans le cas des bâtiments tertiaires ce qui nous permet de mieux visualiser l'impact des incitations proposées.

Dans la figure ci-dessous (**Figure 23**), nous présentons une schématisation de l'approche globale et la méthodologie que nous avons élaborée dans le cadre de notre travail.

Dans ce chapitre, nous commençons dans un premier temps par présenter la première partie de cette approche qui concerne la modélisation et la simulation de l'impact du changement de comportement des occupants sur la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment. Dans le chapitre IV, nous présenterons une étude expérimentale qui vise à créer des profils d'occupants, appliquer des nudges dans le bâtiment sujet de l'étude, et estimer leur impact.

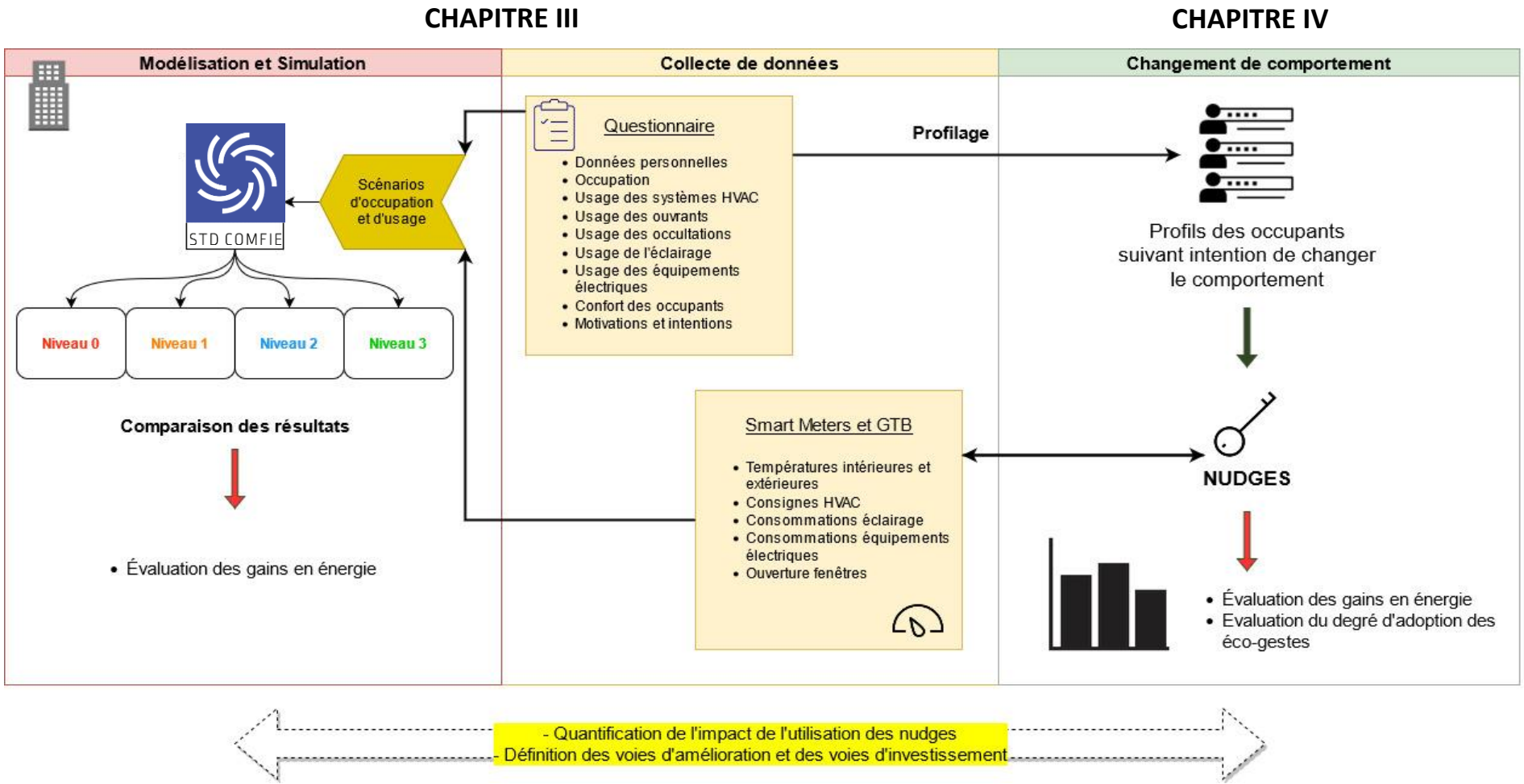


Figure 23: Schéma général de l'approche pluridisciplinaire adoptée pour réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment

2 *Méthodologie*

Dans cette partie nous expliquons la méthodologie développée afin de pouvoir simuler, à partir d'une simulation thermique dynamique, l'impact sur les consommations énergétiques d'un bâtiment dû au changement de comportements des usagers de ce dernier suite à l'intégration de certaines incitations.

L'objectif de notre travail étant de généraliser l'étude du bâtiment en question et de tenir compte surtout de l'impact du comportement de ses occupants sur la réduction des consommations énergétiques, nous essayons de traiter plusieurs possibilités d'usage des systèmes du bâtiment (chauffage, climatisation, éclairage, équipements électriques, fenêtres, stores) en simulant des scénarios fictifs où les occupants adoptent les écogestes et d'autres où ils ne les adoptent pas.

Nous commençons donc dans un premier temps par une simulation d'un cas de base qui nous servira de référence pour évaluer les résultats de notre travail. Ensuite, nous concevons un questionnaire dont nous utilisons les réponses des occupants du bâtiment pour créer des scénarios permettant de simuler les consommations annuelles du bâtiment. L'objectif de cette première étape est de se rapprocher d'un cas réel par simulation thermique dynamique. Nous étudions les différences de résultats entre le cas où les scénarios d'usage sont basés sur des données de questionnaire et le cas de l'utilisation d'algorithmes simple pour modéliser le comportement. De la même manière, nous continuons à générer des scénarios d'usage mais cette fois-ci en nous basant sur des données réelles issues de la GTB du bâtiment et de capteurs connectés utilisés dans l'expérimentation que nous développerons dans les chapitres à venir. Nous comparons ensuite les deux méthodes utilisées.

Cette approche se base sur les travaux de (Yan et al., 2017) qui stipulent qu'il est possible d'utiliser des modèles plus simples suivant les applications et le comportement à simuler. La modélisation doit alors être adaptée à l'objectif en termes de complexité. La (**Figure 24**) montre que le choix du type de modèle à utiliser dépend de l'influence du paramètre étudié sur les résultats ainsi que sur sa facilité de prédiction. Le recours aux données issues de la GTB émane aussi de l'importance de l'introduction de ce type de données dans la STD comme nous l'avons rappelé dans la partie 4 du chapitre I (Džiugaitė-Tumėnienė et al., 2021).

Nous utilisons le module AMAPOLA[29] pour la modélisation du comportement des occupants dans le bâtiment. Il se base sur des scénarios stochastiques pour évaluer les consommations énergétiques de façon plus réaliste qu'une approche purement déterministe. Une fois le cas réel étudié, nous réalisons une série de simulations impliquant des changements de comportement des occupants.

[29] Présenté dans le Chapitre II.

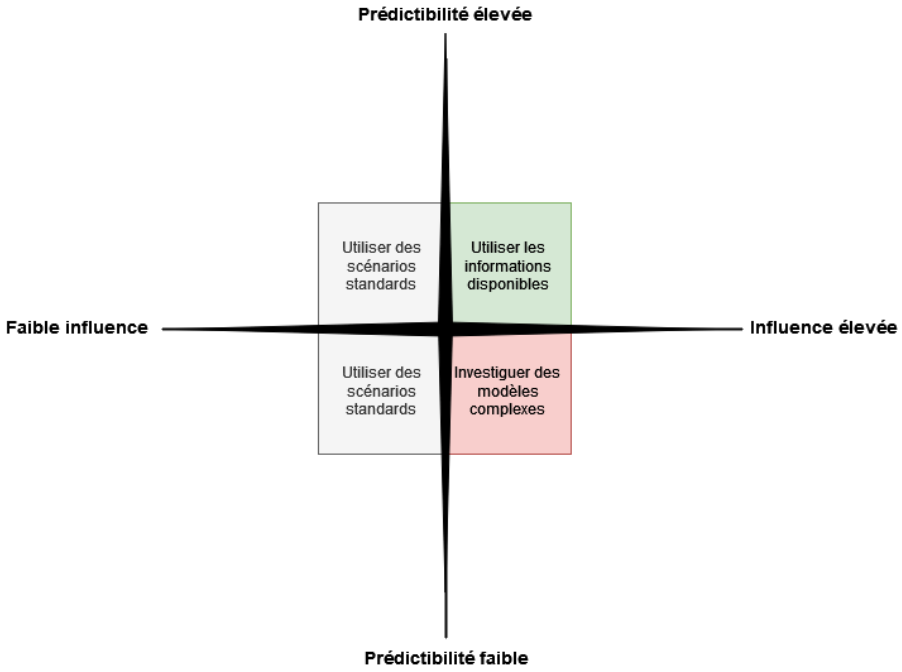


Figure 24 : Sélection du modèle du comportement de l'occupant en fonction de l'influence et de la prédictibilité des aspects du comportements
Source : (Yan et al., 2017)

2.1 *Acquisition des données*

2.1.1 *Questionnaire*

Nous avons choisi d'utiliser le questionnaire comme outil complémentaire de collecte de données pour différentes raisons que nous citons ci-dessous :

- Faible coût.
- Facilité de mise en place.
- Efficace comme moyen complémentaire de collecte de données. Les questionnaires permettent de percevoir les avis et motivations des répondants (Day et al., 2012).

Nous avons porté une attention particulière lors de la création du questionnaire à utiliser des questions les plus simples possibles en évitant toute ambiguïté. Ceci nous a permis de limiter les réponses biaisées de la part des répondants en cas d'incompréhension (Deme Belafi et al., 2018). Nous détaillerons ce point dans le chapitre suivant.

Le questionnaire mis en place dans le cadre de notre étude reflète notre démarche pluridisciplinaire. Il permet à la fois de collecter les données nécessaires à la simulation thermique dynamique mais représente aussi une base pour notre étude comportementale de profilage et d'affectation des nudges.

Dans le cadre de la simulation thermique dynamique, le questionnaire permet de :

- Fournir les informations nécessaires à la création des scénarios d'occupation et d'usage des équipements, ce qui permet de simuler le cas de base et les améliorations de comportement.
- Fournir les informations nécessaires pour comprendre le comportement et générer les scénarios stochastiques.
- Déterminer les niveaux de comportement et la probabilité de leur occurrence.

Nous présentons ci-dessous de manière générale la structure du questionnaire, en cinq parties, une présentation plus détaillée de son contenu faisant l'objet de la partie 0 du CHAPITRE III : , portant sur le comportement et la création des profils des occupants. Nous nous contentons dans cette partie de présenter les données collectées en lien avec la simulation thermique dynamique dans chacune des parties du questionnaire (**Tableau 9**).

<table>
<tr><th>Partie du questionnaire</th><th colspan="2">Données collectées</th></tr>
<tr><td>Partie I :
Faisons connaissance</td><td colspan="2">- Heure d’arrivée au bureau
- Nombre d’heures passées dans le bureau
- Nombre d’heures passées devant l’ordinateur</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Partie II :
Le bâtiment et vous</td><td colspan="2">- <u>Interaction avec les systèmes du bâtiment :</u></td></tr>
<tr><td>Chauffage et climatisation</td><td>- Possibilité de contrôle ou non des consignes
- Changement ou non des consignes par l’occupant</td></tr>
<tr><td>Éclairage</td><td>- Possibilité de contrôle ou non de l’éclairage
- Éclairage : « tout le temps allumé », « tout le temps éteint » ou dépendant de la luminosité de la pièce</td></tr>
<tr><td></td><td>Ouvertures</td><td>- Possibilité de contrôle ou non de l’ouverture des fenêtres
- Scénarios d’ouverture des fenêtres et des portes par saison
- État des fenêtres à l’arrivée
- État des fenêtres au départ</td></tr>
<tr><td></td><td>Système d’occultation</td><td>- Présence ou non de système d’occultation
- Type de système d’occultation
- Scénarios d’occultant par saison
- État de l’occultant à l’arrivée
- État de l’occultant au départ
- Conditions physiques pour ouvrir ou fermer l’occultant</td></tr>
<tr><td></td><td>Équipements électriques</td><td>- Type et nombre d’équipements électriques dans le bureau
- État des équipements au départ du bureau : éteints, en veille, branchés, débranchés
- Mode économie d’énergie actif ou pas
- Recensement des comportements énergivores dans le bâtiment</td></tr>
<tr><td>Partie III :
Le confort et vous</td><td colspan="2">- Confort thermique
- Confort visuel
- Lien entre le confort et la consommation d’énergie</td></tr>
<tr><td>Partie IV :
L’énergie et vous</td><td colspan="2">- Les écogestes effectués par l’occupant dans le bâtiment</td></tr>
<tr><td>Partie V :
Vos intentions VS vos actions</td><td colspan="2">- Non pris en compte dans la STD. Utilisée dans la partie 0 du « CHAPITRE III : » afin de générer les profils des occupants considérés dans l’étude.</td></tr>
</table>

Tableau 9 : Données collectées à partir du questionnaire pour la simulation thermique dynamique

2.1.2 *Capteurs connectés*

2.1.2.1 *Mise en place*

Afin de compléter les données obtenues par questionnaire et pouvoir quantifier de façon plus exacte les réductions de consommation obtenues suite à l'utilisation des nudges, nous avons eu recours à l des capteurs connectés.

Notre choix s'est porté sur les capteurs de la marque Shelly[30] qui permettent de collecter les puissances instantanées de l'appareil sur lequel ils sont branchés suivant un pas horaire. Ainsi nous pouvons suivre l'évolution des consommations d'énergie des différents usages de chaque bureau.

Figure 25: Capteur Shelly1PM installé au niveau du boitier d'éclairage

Les capteurs utilisés présentent l'avantage d'être facile à installer et de pouvoir être contrôlés à distance.

Nous avons utilisé 3 types de capteurs Shelly :

- Capteur Shelly 1 PM qui permet de mesurer les consommations d'un seul appareil. Il a l'avantage d'accepter des puissances qui dépassent 2 000 W. Nous l'avons donc utilisé pour mesurer les consommations des bouilloires et celles de l'éclairage.
- Capteur Shelly 2.5, qui permet de faire deux relevés différents avec le même appareil. Ce dernier est notamment intéressant dans le cas des ordinateurs et de leurs écrans.
- Capteur Shelly Plug qui est une prise connectée de type gigogne se branchant entre une prise murale standard 16 A et les équipements dont elle relève les consommations.

Les appareils concernés par la mesure des consommations d'énergie dans les bureaux étudiés sont les suivants :

- L'éclairage
- Les écrans
- Les ordinateurs
- Les machines à café
- Les bouilloires

[30] https://www.shellyfrance.fr/

- Autres équipements électriques : purificateur d'air

Chaque capteur Shelly utilisé possède une adresse IP qui lui est propre et a la capacité de se connecter sur un réseau wifi choisi et de retourner en temps réel les données collectés sur une plateforme développée par le constructeur. Cependant, cette plateforme n'offre pas une grande capacité de stockage et ne permet pas des possibilités de traitement de données qui répondent au besoin de notre étude, notamment l'envoi du suivi des consommations aux participants et la génération des graphiques correspondants. Un souci d'anonymat et de protection de données en interne nous a également conduit à développer une solution propre à notre étude.
Nous avons dans ce cadre enregistré les adresses IP et mac des différents Shelly sur le réseau du bâtiment. Une base de données InfluxDB[31] a été utilisée afin de stocker l'ensemble des données collectées. Cette dernière est reliée à un outil d'affichage et de monitoring permettant de tracer les graphiques en temps réel en les organisant selon différents tableaux de bord : Grafana[32]. Elle est aussi reliée à la plateforme « Kilowatts » que nous avons développée afin d'envoyer les nudges aux participants. Nous présenterons plus en détail cette plateforme dans la partie 0 de ce chapitre.

Le processus d'acquisition et de visualisation des données par Grafana est représenté sur la **Figure 26** ci-dessous :

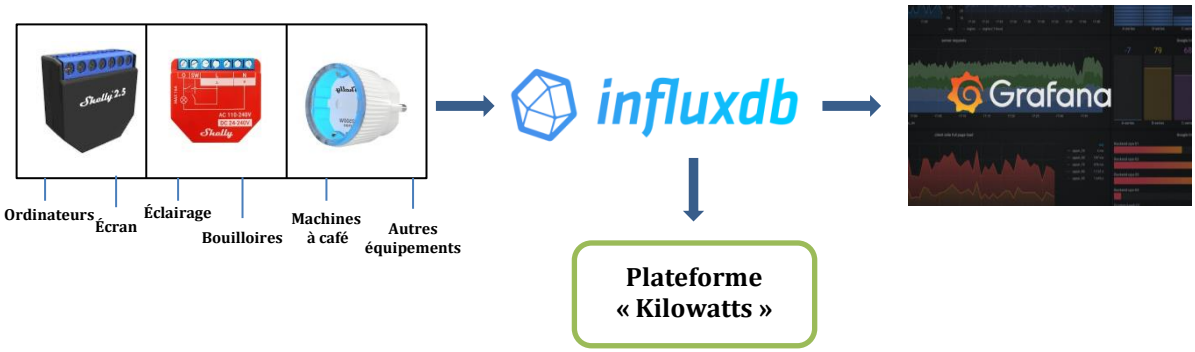


Figure 26: Processus d'acquisition des données par capteurs connectés

2.1.2.2 *Nettoyage des données*

Lors de la collecte des données à partir des capteurs connectés, certaines erreurs inévitables doivent être traitées pour rendre les séries exploitables. Nous distinguons les cas suivants :

- Des données manquantes ou sous forme non numérique qui ne peuvent pas représenter des puissances électriques.
- Des données aberrantes qui se présentent sous forme de puissance qui dépassent un seuil logique.
- Une perte de données sur une longue durée de collecte de données.

[31] Base de données de séries chronologiques permettant de compresser une grande quantité de données venant de plusieurs sources. https://www.influxdata.com/products/

[32] Outil de visualisation spécialisé dans les séries temporelles : https://grafana.com/

Notre collecte de données n'a pas relevée d'erreurs liées ni au premier ni au deuxième cas. L'erreur rencontrée est plutôt liée à une perte de données pendant une longue durée suite soit à un débranchement du capteur soit à un problème de déconnexion du réseau.

Quelques précautions sont à prendre dans le traitement des données reçues. En effet, dans le cas des capteurs que nous utilisons, la valeur des puissances retournée correspond à tout changement de valeur détecté par le capteur. Le capteur retourne donc une valeur de puissance à chaque fois que cette dernière change, même pour une variation de l'ordre de 0,01. Dans le cas où aucune valeur n'est remontée suite à un problème technique, une confusion peut s'installer entre le fait que ce soit une erreur ou que l'appareil a fonctionné à la même puissance durant une longue durée.
En analysant les données collectées, nous remarquons que de façon générale les fluctuations de puissance pour les différents équipements ne dépassent pas une minute. Cela dit, un délai de retour de valeurs qui dépasse la minute peut engendrer une erreur et nous faire considérer des consommations qui concrètement n'ont pas eu lieu. Afin de nettoyer les données fournies, nous adoptons l'approximation suivante :

- Si la durée entre une donnée et la suivante est inférieure à une minute, alors nous gardons la donnée en question.
- Si la durée entre la donnée $P_1(t_1)$ et la donnée suivante $P_2(t_2)$ est supérieure à une minute ($(t_2 - t_1) > 1$ min), alors nous considérons la première donnée P_1 pendant une minute et nous annulons toutes les données qui vont suivre entre t_1 et t_2. Nous considérons ensuite la puissance P_2 correspondante à l'instant t_2.

Ce nettoyage de données est indispensable dans le calcul des consommations d'énergie que nous allons effectuer dans les parties suivantes.

2.2 *Choix de l'outil de simulation thermique dynamique*

Nous avons déjà précisé dans le chapitre II, partie 3.2.2 , que les logiciels de simulation thermique dynamique qui semblent les plus adéquats dans le cadre de nos travaux sont les logiciels energyPlus et Pleiades+Comfie. Compte tenu des objectifs de notre travail qui se positionnent dans le contexte français visant des objectifs de sobriété énergétique, notre choix s'est finalement porté sur le logiciel Pleiades pour deux raisons :

- Facilité d'utilisation. Le logiciel Pleiades + Comfie est connu pour représenter un compromis entre une interface simple et facile à utiliser (ce qui n'est pas le cas pour d'autres outils plus élaborés comme TRNSYS, ESP-r ou EnergyPlus) et la qualité des résultats qu'il fournit. Le logiciel prend en considération tous les paramètres nécessaires à une simulation thermique durant une année en plus des données géographiques et météorologiques de l'emplacement du bâtiment.
- Le logiciel a passé avec succès différentes études de validation (Brun et al., 2009) dont la procédure internationale BESTEST de comparaison numérique des modèles de référence (Judkoff and Neymark 1995, 2013). Sa fiabilité a aussi fait objet d'études dans le contexte particulier de bâtiments à haute performance (Munaretto et al. 2013 ; Recht et al. 2014).

En ce qui concerne les points faibles liés au manque de flexibilité du logiciel pour l'intégration d'un modèle occupant ou pour l'accès au cœur du logiciel, nous avons fait le choix d'utiliser le module AMAPOLA présenté précédemment (Chapitre II –partie 3.2.2) et qui permet de réaliser une multitude de simulations basées sur un modèle stochastique permettant de dresser une

marge d'erreur quant aux consommations d'énergie du bâtiment. En analysant les travaux de la littérature, nous nous sommes rendu compte que le module AMAPOLA a surtout été utilisé dans des études d'optimisation (Pannier et al., 2021). Les travaux de (Pannier et al., 2022) ont utilisé le module pour générer des scénarios permettant de comparer les gains en énergie suivant des probabilités d'adoption des comportements de réduction d'énergie. Les travaux qui ont donc utilisé AMAPOLA pour simuler le comportement des occupants dans le bâtiment sont rares. Il serait intéressant d'utiliser cet outil pour quantifier les gains en énergie dus à un changement de comportement. Ceci faciliterait l'intégration d'une approche de changement de comportement et de proposer des solutions adaptées.

3 *Simulation thermique dynamique du cas de base*

Le logiciel Pleiades-Comfie fait la différence entre la STD et la SED (Simulation thermique dynamique avec équipements) comme le montre le **Tableau 10** ci-dessous :

STD	SED
- Calcule l'énergie utile - Calcule les besoins de chauffage et de climatisation suivant les consignes de température - Tient compte de la ventilation seulement - Ne tient compte ni des équipements de chaud et froid, ni des équipements d'ECS - Calcule les températures et l'humidité dans chaque zone du bâtiment - Suppose une réactivité immédiate des systèmes de régulation pour les consignes de températures	- Tient compte des émetteurs de chaud et de froid - Tient compte des équipements d'ECS - Tient compte des systèmes de ventilation - Calcule les consommations d'énergie annuelle des différents systèmes

Tableau 10 : Comparaison entre la STD et la SED

Par abus de langage, la STD fait souvent référence à une SED. Dans le travail qui va suivre, nous ferons référence par STD aux différentes SED réalisées afin d'évaluer les consommations énergétiques du bâtiment étudié.

Une modélisation du bâtiment sujet de l'étude a été réalisée suivant des hypothèses de base afin de créer le cas qui servira de référence pour pouvoir quantifier les effets des nudges sur la consommation d'énergie. Nous présentons dans ce qui suit tous les éléments nécessaires à l'établissement de nos modèles (cas de base, cas à partir des données issues de questionnaire et cas à partir des données de capteurs) ainsi que les résultats obtenus.

3.1.1 *Modèle du bâtiment étudié*

Nous avons remarqué dans d'autres travaux que les résultats de la simulation thermique dynamique se basent soit sur des bâtiments réels, soit sur des bâtiments fictifs représentés par une forme géométrique simple et des systèmes énergétiques simplifiés afin de faciliter l'étude. Dans notre cas, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle existant d'un bâtiment occupé afin de pouvoir obtenir des résultats concrets et réels reflétant de façon chiffrée l'impact du comportement des occupants et de son changement.

Le bâtiment, objet de l'étude, est un bâtiment de bureaux appartenant à Mines Paris -PSL occupé par des fonctionnaires publics, des chercheurs ainsi que des doctorants. Il est situé à Sophia Antipolis à 30 km de la ville de Nice. Il est constitué de 2 étages comportant des salles de réunion, des bureaux et des salles d'impression. Le bâtiment a été construit en 2006, il ne

possède donc pas la contrainte d'ancienneté et permet de se focaliser sur l'impact du comportement de ses occupants plutôt que sur d'éventuelles solutions liées à la rénovation ou à l'amélioration de son enveloppe. Le bâtiment étudié est équipé d'un système de pompe à chaleur pour le chauffage et la climatisation, ainsi que d'un système GTB afin de piloter les consignes de chauffage et de rafraichissement du bâtiment. L'eau chaude sanitaire est assurée par un ballon installé dans le sous-sol du bâtiment.

3.1.2 *Données d'entrée du cas de base*

Dans cette partie, nous présentons les données nécessaires à la simulation thermique dynamique du cas de base, autrement dit toutes les hypothèses nécessaires pour lancer la simulation et les informations sur le bâtiment.

- **Le fichier météo**

Nous avons utilisé les données météorologiques générées par le logiciel RETScreen pour l'année 2022 afin de créer le fichier météo importé dans le logiciel Pleiades+Comfie à travers le module Meteonorm. La station utilisée est celle de Nice Aéroport, la plus proche du site.

D'après la documentation[33], certaines données sont obligatoires, d'autres sont optionnelles. Ci-dessous les données importées dans les fichiers météo :

- <u>Données obligatoires :</u>
    - La température de l'air
    - Le rayonnement global horizontal[34]
    - Le rayonnement diffus horizontal[35]
- <u>Données optionnelles :</u>
    - L'humidité relative de l'air
    - La vitesse du vent
    - La direction du vent
    - La température d'eau froide

- **Les données géographiques**

Les données géographiques de l'emplacement du bâtiment sont aussi à définir au niveau du logiciel en intégrant la position géographique du bâtiment (**Figure 27**) :

[33] https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Accueil

[34] Énergie rayonnante totale du soleil qui atteint une surface horizontale de la Terre au cours d'une unité de temps précise.

[35] Énergie lumineuse provenant de toute l'atmosphère en excluant le rayonnement direct du soleil sur un plan horizontal.

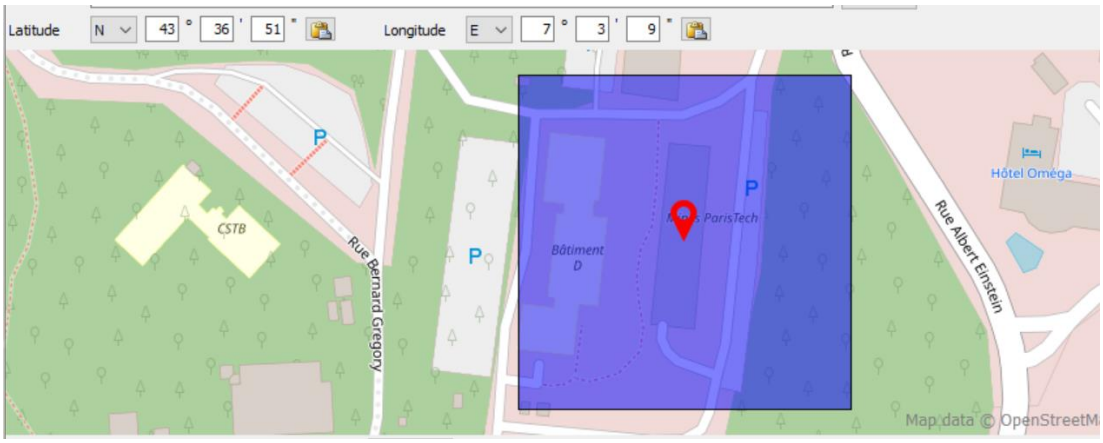


Figure 27: Emplacement géographique du bâtiment d'étude

Les masques présents autour du bâtiment sont intégrés en définissant son environnement urbain à partir de sa situation géographique en utilisant une carte en ligne. Nous considérons une hauteur de 10 m pour les masques autours du bâtiment (**Figure 28**). Nous rajoutons aussi quelques arbres autour du bâtiment en question afin de modéliser l'environnement végétal qui l'entoure. La vue 3D du bâtiment et de son environnement est représentée sur la (**Figure 29**).

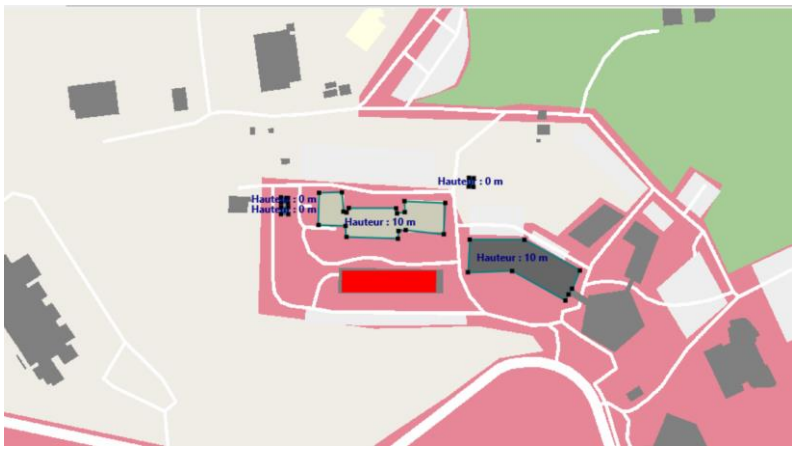


Figure 28: Environnement urbain du bâtiment d'étude

Figure 29 : Vue 3D du bâtiment et de son environnement urbain

- **Enveloppe du bâtiment**

L'enveloppe du bâtiment est un élément important dans la simulation des échanges thermiques entre les parois. Il est important de définir dans le cas de base une enveloppe de bâtiment qui se rapproche du bâtiment réel.
Nous résumons dans le tableau ci-dessous la composition de cette enveloppe. Les composants sont cités de l'extérieur à l'intérieur :

		Composition	cm	Coefficient de transfert thermique ($W/m^2.K$)	Résistance thermique totale ($m^2.K/W$)
Murs	**Murs extérieurs**	Enduit extérieur	1,5	0,36	2,72
		Béton lourd	20		
		Polystyrène expansé	10		
		Placoplatre BA 13	1,3		
	Cloisons internes	Placoplatre BA 13	1,3	4,16	0.24
		Lame d'air	5		
		Placoplatre BA 13	1,3		
Planchers	**Plancher bas**	Béton lourd	20	0,75	1,44
		Polyuréthane	4		
	Plancher intermédiaire	Plâtre	1	4,16	0,24
		Lame d'air (faux plafond)	30		
		Béton lourd	16		
Toiture	**Terrasse**	Sable + gravier	5	0,53	1,86
		Plaques de perlite	8		
		Mortiers de ciment	15		
		Béton lourd	20		
		Lame d'air (faux plafond)	30		
		Plâtre	1		

Tableau 11 : Composition de l'enveloppe du bâtiment

- **Les générateurs de chaud et de froid**

Le système de chauffage et de refroidissement dans le bâtiment est assuré par une pompe à chaleur réversible air/eau (générateur thermodynamique) dont voici les caractéristiques techniques :

- Puissance absorbée pour le refroidissement : 69,8 kW
- Puissance absorbée pour le chauffage : 69,6 kW
- Coefficient de performance (COP)[36] : 3,5

- **Saisons de chauffe et de rafraîchissement**

[36] Le coefficient de performance, ou COP, d'une pompe à chaleur est le quotient de l'énergie thermique produite par l'électricité consommée.

La définition des saisons de chauffe et de rafraichissement est nécessaire pour le choix des périodes d'usage des équipements de chauffage et de refroidissement. Il n'est nul besoin de définir des scénarios annuels ; les systèmes sont en arrêt en dehors de ces périodes.

Dans le cas de notre bâtiment, et en tenant compte du choix du gestionnaire du bâtiment, nous définissons les périodes de chauffe et de refroidissement comme suit (**Figure 30**):

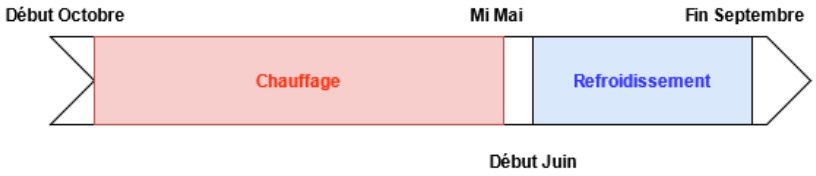


Figure 30: Définition des saisons de chauffe et de refroidissement dans le bâtiment

- **Les émetteurs de chaud et de froid**

Des ventilo-convecteurs en plafond assurent la diffusion de l'énergie thermique dans les locaux pour maintenir une température de consigne. Nous disposons des informations sur le nombre et l'emplacement de ces émetteurs (**Figure 31**). Nous définissons pour les ventilo-convecteurs les données suivantes :

- La variation temporelle qui représente la précision de la régulation terminale du couple régulateur/émetteur à l'échelle du local.
- La variation spatiale.
- La puissance électrique des trois régimes de vitesse : petite, moyenne et grande vitesse.

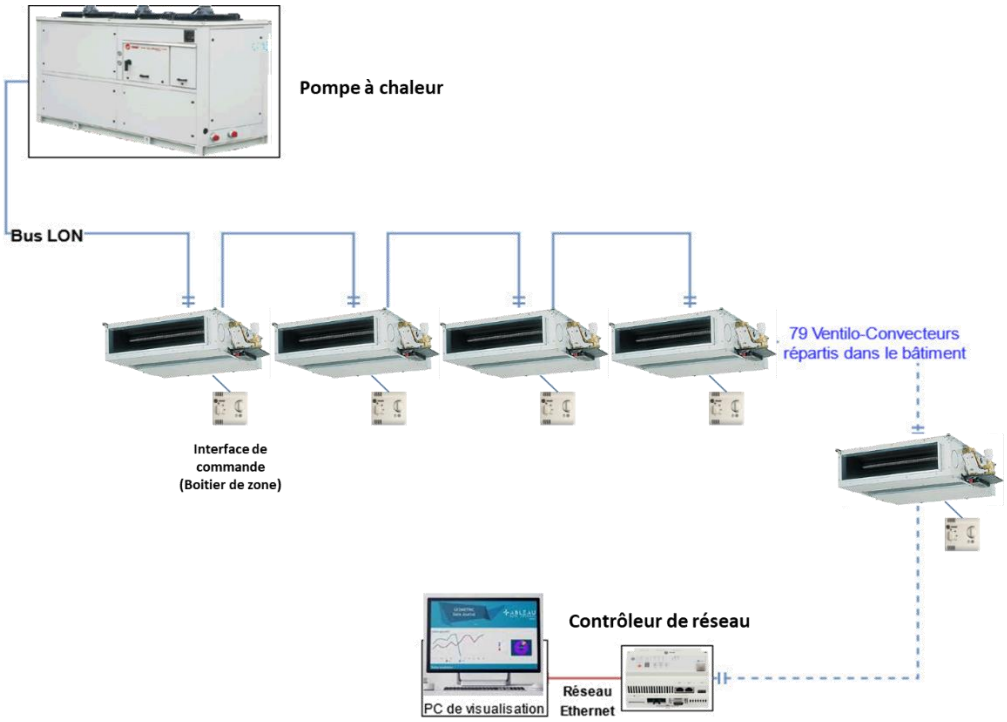


Figure 31: Schéma BUS de l'installation PAC + Ventilo-convecteurs

- **Le système de ventilation**

La ventilation dans le bâtiment peut être modélisée de deux façons :

- *Saisie simplifiée* basée sur des scénarios de ventilation estimés par l'utilisateur afin de représenter le flux d'air provenant des menuiseries.
  Elle est préconisée dans les cas où il n'y a pas de mouvement d'air entre les différentes zones thermiques. C'est en particulier le cas d'un immeuble où chaque appartement est considéré comme zone thermique et qu'un scénario de ventilation est utilisé afin de représenter la ventilation externe par appartement.
- *Saisie détaillée (Calcul aéraulique),* le logiciel calcule les différentiels de pression issus de la prise en compte des systèmes de ventilation, des menuiseries, des perméabilités des parois, de l'exposition au vent pour en déduire les mouvements d'air entre les pièces et donc entre les zones thermiques.

La saisie simplifiée n'est pas favorable dans notre cas en raison du rôle important de l'échange de l'air entre les différents bureaux afin d'estimer le rôle du comportement de l'occupant surtout en ce qui concerne l'ouverture et la fermeture des fenêtres et des portes.

Nous considérons les hypothèses ci-dessous pour le système de ventilation et les échanges d'air :

- Enveloppe aéraulique.
- Entrées d'air dans les bureaux.
- Bouches d'extraction d'air dans les couloirs et sanitaires.
- Les fenêtres sont tout le temps fermées.
- Les portes sont tout le temps ouvertes.
- Les systèmes d'occultation sont tout le temps ouverts.

- **Éclairage**

Le bâtiment d'étude est entièrement équipé de pavés de tubes fluorescents. Nous effectuons une étude d'éclairement naturel qui permet d'estimer la quantité de lumière naturelle dans les bureaux. Pour cela, il faut choisir la référence du point d'éclairement naturel. Dans le cas d'un bureau individuel, il faut prendre comme référence la moyenne des points, pour des bureaux paysagers il faut plutôt choisir le point le plus sombre comme référence.

Pour le cas de base, et vu son aspect général, nous supposons que les occupants ne tiennent pas compte de la lumière naturelle et gardent le même niveau d'éclairage tout le temps comme souvent considérés dans les études avant conception.

- **Scénarios d'usage**

Pour tous les scénarios présentés ci-dessous, nous fixons les jours de congés comme suit :

- Jours fériés de l'année 2022.
- Vacances de fin d'année : Du 25/12 au 1/01.
- Vacances d'été : Du 1/08 au 15 /08.

  - <u>Occupation</u>

Pour les scénarios d'occupation, nous nous basons sur les scénarios de la méthode Th-BCE (*Méthode de calcul Th-BCE 2012*, 2013) relatifs à l'usage de bureaux.

Nous utilisons cinq scénarios différents suivant les pièces. Ces scénarios incluent bien entendu les jours ouvrés et les weekends ainsi que les jours de congés présentés précédemment.

- Scénario bureau.
- Scénario circulation – accueil.
- Scénario salle de réunion.
- Scénario salle de conférence.
- Scénario sanitaires collectifs.

▪ Chauffage et refroidissement

Nous supposons pour le cas de base que la consigne de chauffage et de climatisation reste constante tout le temps. On retrouve ce cas pour les bâtiments où l'occupant est chargé d'éteindre le chauffage et la climatisation en quittant le bureau et d'adapter la température de consigne dans le bureau.

On retrouve ce cas dans les situations où le contrôle du système de chauffage et de climatisation dans le bâtiment étudié connait un disfonctionnement, ce qui fait que la consigne de chauffage est maintenue jour et nuit. C'est dans ce genre de situations que le rôle de l'occupant et son éducation s'avèrent importants malgré les avancées technologiques comme nous avons pu le montrer dans les chapitres précédents.

D'après la GTB, la consigne de chauffage est maintenue à 22,5°C et la consigne de climatisation est réglée à 23°C. Les scénarios de chauffage et de climatisation annuels sont donc maintenus à ces consignes toute l'année.

▪ Puissance dissipée

Les scénarios de puissance dissipée permettent de représenter les apports internes de chaleur liés aux équipements électriques ou gaz qui libèrent de la chaleur (éclairage, cuisson, informatique, etc.).
Nous considérons que la puissance dissipée des équipements électriques utilisés correspond à leur consommation électrique en W. Il s'agit d'ailleurs des valeurs utilisées par le logiciel pour calculer les consommations d'énergie des usages spécifiques.

Dans la littérature, les puissances d'usage des appareils dans le bureau varient suivant les technologies et les dates des travaux. Pour souligner cette variation, nous dressons le tableau ci-dessous :

Station de travail avec écran (W)			**Ordinateur portable (W)**			**Source**
En marche	*En veille*	*Éteint*	*En marche*	*En veille*	*Éteint*	
30 - 60	25	1 - 3	12 - 22	1,5 - 6	1,5 - 2	(Kawamoto et al., 2002)
70	9	3	19	3	-	(Roberson et al., 2002)
55	25	1,5	15	3	2	(Kawamoto et al., 2004)
79	3,2	-	74,7	1,6	-	(Moorefield et al., 2008)
50 - 100	-	-	15 - 40	-	-	
64 - 169	-	1,9 - 2	18 - 41	-	0,3 - 1	(Menezes et al., 2013)
60 - 250	1 - 6	-	15 - 45			("Power Management Statistics," 2018)

Tableau 12: Puissances des appareils électriques dans les bureaux d'après des travaux de la littérature

Dans le cadre de notre étude, nous considérons pour les scénarios de puissance dissipée les équipements suivants dans chaque bureau (**Tableau 13**). Pour définir les puissances des équipements en question, nous nous basons sur les capteurs pour mesurer la puissance des équipements utilisées.

Pour le calcul des puissances horaires des machines à café et des bouilloires, sachant que leur usage ne dépasse pas les 4 minutes, nous adoptons l'approximation suivante :

La puissance de fonctionnement d'une bouilloire est de 2000 W. Pour un fonctionnement de 4 minutes, nous comptons une consommation totale de :

$$2000\ W\ \times 4\ min = \frac{2000\ W\ \times 4\ h}{60} = 133\ Wh$$

Nous pouvons donc considérer une puissance de 133 W pour chaque heure pendant laquelle la bouilloire a fonctionné. Le même calcul s'applique pour le cas de la machine à café.

Équipement (W)	En marche	En veille	Éteint
Ordinateur	100	20	0
2 écrans	40	10	0
Un téléphone fixe	5		
Une machine à café	125		
Une bouilloire	133		

Tableau 13 : Puissances électriques considérées pour les équipements électriques des bureaux

En considérant le cas de base où ces appareils sont utilisés pendant les jours de travail de 7h à 18h et sont en veille pendant les weekends et les jours de vacances, nous obtenons les scénarios de puissance dissipée ci-dessous (**Figure 32**) :

Jours — Afficher le nom

S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	Ouvré Normal	30	30	30	30	30	30	30	145	270	145	270	145	145	145	145	278	145	145	145	30	30	30	30	30
	WE Réduit	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	WE Normal	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Ouvré Réduit	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Semaines

Nom	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	Ouvré Normal	WE Normal	WE Normal
Vancances	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	Ouvré Réduit	WE Réduit	WE Réduit

Figure 32 : Scénario de puissance dissipée pour le cas de base

- <u>Éclairement</u>

Nous définissons le niveau d'éclairement suivant l'usage de la pièce comme suit (**Tableau 14**) suivant la norme *EN 12464-1* :

Pièce	Niveau d'éclairement en Lux
Bureau	500
Salle de réunion	500
Sanitaires collectifs	200
Circulation – Accueil	100
Salle de conférence	300

Tableau 14 : Niveau d'éclairement à appliquer suivant l'usage de la pièce

Les horaires d'éclairage des pièces sont de 7h à 18h pour toutes les pièces sauf les couloirs pour lesquels on définit un scénario de 7h à 20h.

Le logiciel de simulation distingue deux coefficients de foisonnement d'utilisation :

- C1 qui traduit l'occupation effective des locaux et permet la prise en compte détaillée des modes de gestion de l'éclairage. Il est défini suivant le mode de gestion d'éclairage suivant la méthode Th-BCE 2012. Dans le (**Tableau 15**) les valeurs correspondantes au système de gestion d'éclairage telles que proposées par le logiciel :
-

Gestion de l'éclairage	Coefficient C1
Pas de gestion	1
Interrupteur manuel marche/arrêt	0,9
Interrupteur manuel marche/arrêt et extinction automatique	0,85
Marche et arrêt automatiques par détection de présence et absence	0,8
Marche manuelle, arrêt automatique par détection d'absence	0,7

Tableau 15 : Coefficient de foisonnement d'utilisation C1 suivant le type de gestion de l'éclairage

- C2 qui traduit la dépendance de l'éclairage artificiel à la lumière naturelle. Il est défini suivant un mode de gradation de l'éclairage et varie entre 0 et 1 en fonction de l'éclairage naturel de la pièce.
  Les coefficients C1, Ei A, Ei B, Ei C et C2 B peuvent être ajustés pour prendre en compte "une sensibilité" différente de l'utilisateur par rapport à ce que prévoit la méthode Th-BCE comme le montre (**Figure 33**).

Dans cet exemple, les valeurs peuvent être lues de la manière suivante :

- Entre 0 et 100 lux d'éclairement naturel dans la pièce, C2 = 1
- Entre 100 et 700 lux d'éclairement naturel dans la pièce, C2 diminue jusqu'a 0,3
- À partir de 700 lux d'éclairement naturel dans la pièce, C2 diminue jusqu'à s'annuler à partir de 2800 Lux.

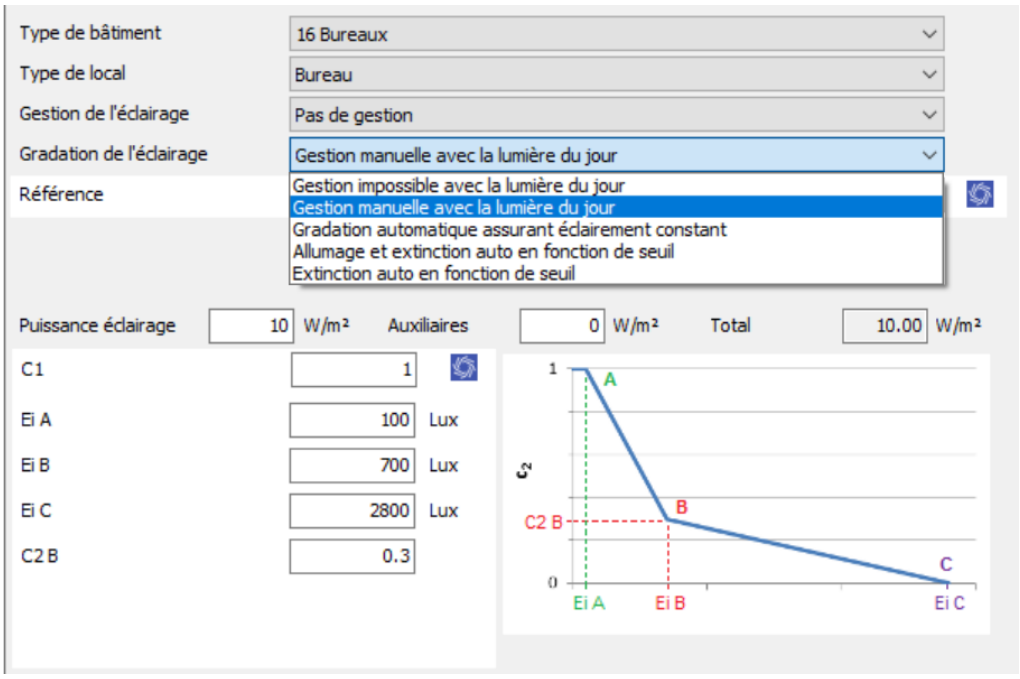


Figure 33: Paramétrage des coefficients de foisonnement de l'éclairage

Dans notre cas pour la gestion de l'éclairage, il s'agit d'un système manuel sans détecteur de mouvement ou de présence. Le système ne tient pas compte non plus de la lumière naturelle. Nous choisissons donc les valeurs « Pas de gestion » pour la gestion de l'éclairage et « Gestion impossible avec la lumière du jour » pour la gradation de l'éclairage.

Un coefficient C1=1 est donc multiplié à la puissance de l'éclairage afin d'exprimer les consommations d'énergie de ce poste.

- Ouvertures et systèmes d'occultation

Comme précisé précédemment, les scénarios d'ouverture de fenêtres correspondent à 0 %, les ouvertures de portes correspondent à 80 % avec absence de scénarios de système d'occultation.

Les données du cas de base ainsi renseigné, nous réalisons une simulation annuelle avec un pas de temps d'une demi-heure en tenant compte des apports solaires et internes ainsi que du calcul de l'éclairement naturel et du calcul aéraulique.

Par la suite les résultats de ce cas de base avec les hypothèses décrites ci-dessus seront comparés avec les résultats obtenus en simulant la consommation annuelle d'énergie du même bâtiment mais en se basant sur les données issues du questionnaire dans un premier temps et ensuite des capteurs et de la GTB du bâtiment.

3.1.3 *Simulation thermique dynamique par données du questionnaire*

Nous avons établi un cas d'étude intégrant les réponses obtenues du questionnaire présenté dans le cas de la STD dans la partie 2.1.1 du chapitre III qui a été soumis aux occupants afin de simuler de façon plus proche de la réalité leurs consommations d'énergie. Les questions permettant de générer les scénarios correspondants seront présentées au fur et mesure de la présentation de chaque système d'usage d'énergie. Les scénarios d'usages crées sont importés dans le logiciel. Nous présentons dans ce qui suit le détail de la création de ces scénarios :

- **Occupation**

Ce scénario est primordial car le reste des scénarios liés aux actions des occupants se basent sur leur présence ou non. À partir des réponses liées aux horaires d'arrivée et du temps passé dans le bureau, nous créons pour chaque bureau son scénario d'occupation.

Nous considérons qu'une pause déjeuner d'une heure est réalisée entre 12h et 13h pour tous les bureaux suite à des observations quotidiennes.

- **Consignes de température**

Les réponses obtenues au questionnaire concernant le ressenti des occupants dans le bâtiment sont les suivantes :

Data	Response	%
Ni chaud , ni froid	34	65%
Légèrement chaud	6	12%
Chaud	5	10%
Légèrement froid	4	8%
Très chaud	2	4%
Froid	1	2%
Très froid	0	0%

Figure 34 : Réponses des occupants sur leur ressenti général dans leurs bureaux

Afin de s'approcher du cas réel et définir les consignes de température qui correspondent au ressenti des occupants dans leur espace de travail, nous adoptons l'approximation suivante pour les consignes de chauffage et de climatisation :

Ressenti de l'occupant	Consigne de chauffage (°C)	Consigne de climatisation (°C)
Très chaud	21	22
Chaud	21,5	22,5
Légèrement chaud	22	23
Ni chaud, ni froid	22,5	23
Légèrement froid	23	24
Froid	24	24,5
Très froid	24,5	25

Tableau 16 : Consignes de chauffage et de climatisation correspondant au ressenti de l'occupant exprimé dans le questionnaire

- **Puissances dissipées par les équipements**

L'utilisation des réponses au questionnaire permet d'obtenir des résultats plus précis quant à l'usage des équipements électriques dans les bureaux et la puissance dissipée qu'ils dégagent. Il est important dans ce cas de tenir compte du type d'équipements dans chaque bureau, de leurs puissances respectives et des heures d'usage même en dehors des horaires d'occupation. Les heures d'arrivée, de départ et de pauses doivent être prises en considération dans le calcul de ces puissances. Des consommations importantes sont relevées par les appareils électriques dans les bureaux durant les heures de non présence des occupants (Gunay et al., 2016b).

Le questionnaire fournit les informations suivantes :

- Types d'équipements dans les bureaux.
- Les équipements mis en veille au départ de l'occupant.
- Les équipements éteints au départ de l'occupant.

Nous créons donc un algorithme qui permet de générer pour chaque bureau le scénario de puissance dissipée à importer dans le logiciel en se basant sur les réponses de l'occupant et les puissances du (**Tableau 13**) et en considérant bien entendu les horaires d'arrivée et de départ du bureau ainsi que l'approximation d'une pause d'une heure de 12h à 13h.

- **Éclairement**

Le scénario d'éclairement suit celui de l'occupation dans les bureaux où les occupants déclarent ne pas tenir compte de la lumière naturelle pour allumer ou éteindre les luminaires.
Dans le cas des occupants favorisant l'éclairement naturel, nous utilisons dans le logiciel la

gradation suivante « Gestion manuelle avec la lumière du jour » qui permet de tenir compte des apports de lumière naturelle de la pièce.

En ce qui concerne la génération des scénarios d'éclairement, nous fixons comme dans le cas de la partie précédente les besoins d'éclairage à 500 Lux et nous adoptons la logique suivante (Figure 35).

Nous considérons que si les luminaires ne sont pas éteints au départ des occupants, le staff de sécurité se charge de les éteindre à 20h.

	Réponses questionnaire	Scénario d'éclairement correspondant
Durant les heures de présence	Éclairage tout le temps éteint durant la journée	- 0 Lux durant les heures de présence
	Éclairage tout le temps allumé durant la journée	- 500 Lux durant les heures de présence - Gestion impossible avec la lumière du jour
	L'éclairage dépend de la luminosité de la pièce	- Gestion manuelle avec la lumière du jour
Durant les heures d'absence	Vous éteignez l'éclairage à chaque fois que vous quittez le bureau pour plus de 10 minutes	OUI : 500 lux toute la journée et 0 lux durant les heures de pause
		NON : 500 Lux toute la journée
	A votre depart, vous éteignez l'éclairage	OUI : 0 lux à partir de l'heure de départ jusqu'à l'heure d'arrivée du lendemain
		NON : 500 lux depuis l'heure de départ jusqu'à 20h

Figure 35: Génération des scénarios d'éclairage à partir du questionnaire

- **Ouverture des portes**

Suivant qu'il s'agisse de saison de chauffage, de climatisation ou de l'intersaison (ni chauffage, climatisation), nous distinguons les trois états de porte ci-dessous :

- Porte de bureau tout le temps ouverte. Dans ce cas, le scénario d'ouverture de porte dans le bureau en question suit celui de l'occupation. La porte est ouverte à l'arrivée de l'occupant et est fermée à son départ. Le ratio d'ouverture dans ce cas est de 80 %.
- Porte tout le temps fermée.
- Parfois ouverte, parfois fermée. Dans ce cas aussi l'ouverture de la porte suit le scénario d'occupation mais avec un ratio de 40 %.

- **Ouverture / fermeture des fenêtres**

D'après le questionnaire, les motivations principales derrière l'ouverture des fenêtres sont les besoins en air frais (41 %) et le confort thermique en ramenant de l'air frais à l'intérieur (23 %). Pour la fermeture des fenêtres, les raisons principales sont la réduction des bruits extérieurs (20 %), le confort thermique en bloquant l'air frais ou l'air chaud (36 %) (**Tableau 17**)

Ouverture des fenêtres	
Avoir de l'air frais	41 %
Assurer le confort	23 %
Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager	12 %
Économiser l'énergie	10 %
Écouter les sons extérieurs	8 %
Par habitude	3 %
Covid-19	3 %

Fermeture des fenêtres	
Réduire les bruits extérieurs	20 %
Assurer le confort	18 %
Température extérieure trop froide / chaude	18 %
Éviter les polluants / insectes …	14 %
Économiser l'énergie	9 %
Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager	9 %
Pour des raisons de sécurité	5 %
Par habitude	5 %
Ne ferme pas les fenêtres	2 %

Tableau 17 : Motivations d'ouverture ou de fermeture de fenêtres d'après le questionnaire

En se basant sur cette information, il apparait judicieux de travailler avec un modèle basé sur les températures afin de définir les ouvertures et fermetures des fenêtres. Le logiciel Pleiades+Comfie permet une ouverture de fenêtres dite « détaillée » qui prend en considération les températures de seuil et la différence de température entre extérieur et intérieur afin de déterminer les scénarios d'ouverture et de fermeture des fenêtres suivant les saisons (**Figure 36**).

Nous n'avons cependant pas pu nous baser sur ce mode d'ouverture vu qu'en STD, ce dernier considère les portes intérieures comme toujours ouvertes. Nous avons donc décidé de dresser une logique simple de l'état des fenêtres basée sur les réponses des occupants à trois questions principales :

- État des fenêtres matin et après-midi pendant les trois saisons : de chauffage, de refroidissement et la mi- saison.
- Action de l'occupant sur la fenêtre en quittant le bureau.
- Action de l'occupant sur la fenêtre en arrivant au bureau.

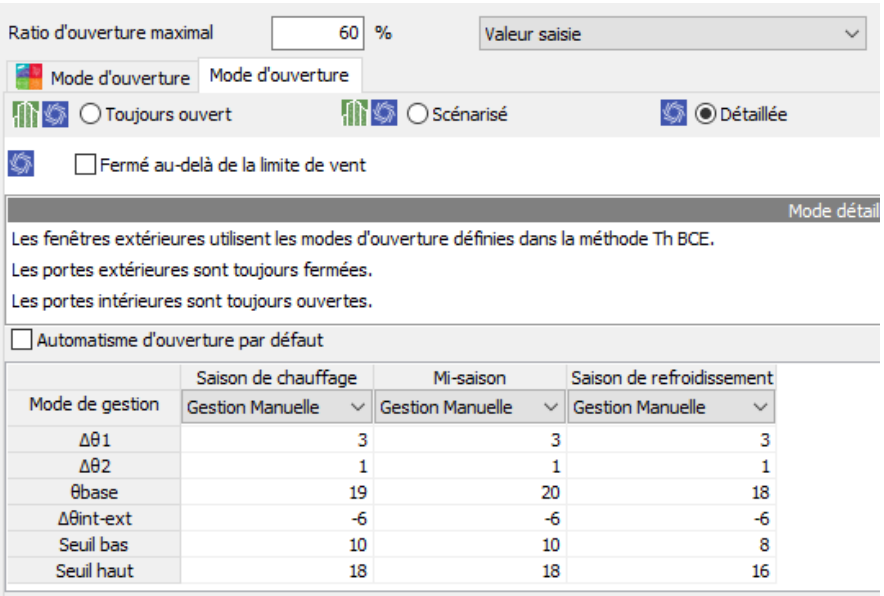


Figure 36: Interface de définition du mode d'ouverture détaillée dans le logiciel Pleiades Comfie

Nous présentons ci-dessous la logique de génération des scénarios d'ouverture des fenêtres :

Les scénarios d'ouverture des fenêtres entre 10h et l'heure du départ de l'occupant sont définis suivant le tableau ci-dessous :

	Saison de chauffage	Saison de climatisation	Intersaison
Tout le temps fermées			
Tout le temps ouvertes			
Ouvertes le matin, fermées l'après-midi			
Fermées le matin, ouvertes l'après-midi			

Tableau 18: Modèle du questionnaire sur les données d'ouverture des fenêtres

L'état de la fenêtre le matin correspond à son état de 10h à 13h. Son état l'après-midi correspond à la période de 13h à l'heure de départ de l'occupant.

En ce qui concerne l'état des fenêtres le reste de la journée, nous nous basons sur les actions des occupants au départ du bureau et à l'arrivée afin de les définir suivant la logique suivante (**Figure 37**) :

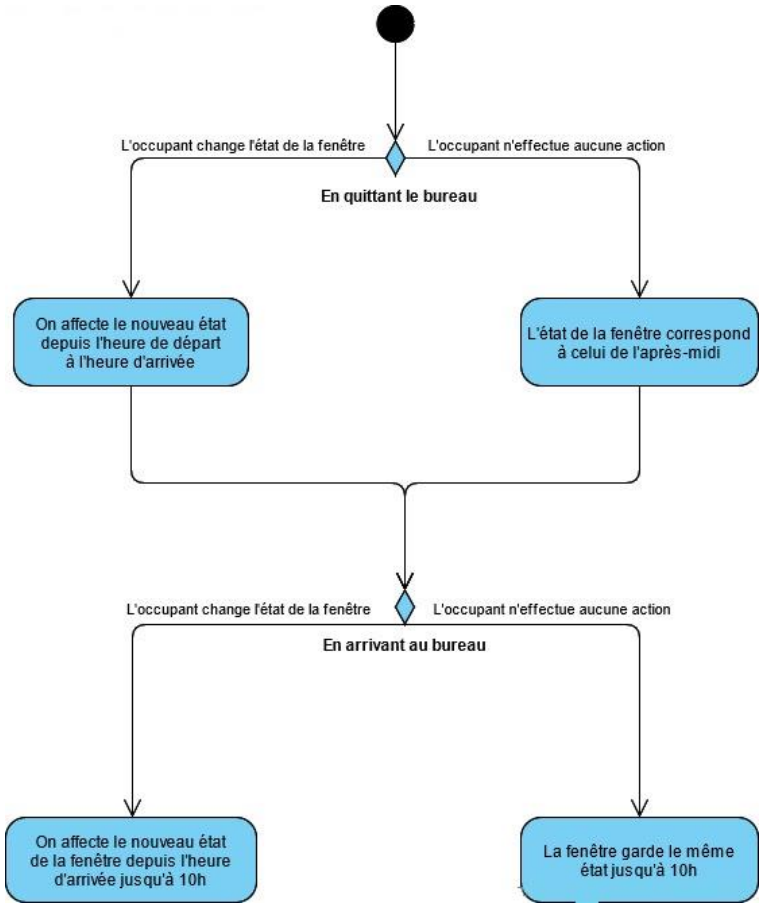


Figure 37: Génération des scénarios d'ouverture / Fermeture des fenêtres depuis questionnaire

- **Système d'occultation**

D'après les réponses au questionnaire, la raison principale derrière l'ouverture des systèmes d'occultation est le besoin en lumière naturelle (39 %). Les raisons principales derrière la fermeture des systèmes d'occultation sont : la réduction de l'éblouissement (32 %) et la réduction de la surchauffe due au rayonnement solaire direct (28 %) (**Tableau 19**).

Ouverture des systèmes d'occultation	
Laisser entrer plus de lumière naturelle	39 %
Avoir la vue sur l'extérieur	23 %
Réchauffer le bureau grâce au rayonnement solaire	12 %
Économiser l'énergie	11 %
Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager	11 %
Ne les ouvre pas	4 %
Fermeture des systèmes d'occultation	
Réduire l'éblouissement sur l'écran	32 %
Réduire la surchauffe due au rayonnement solaire direct	28 %
Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager	14 %
Économiser l'énergie	10 %
Ne les ferme pas	8 %
Autres réponses	3 %

Tableau 19 : Motivations d'ouverture ou de fermeture des systèmes d'occultation d'après le questionnaire

Nous obtenons les états des systèmes d'occultation dans chaque bureau, comme précisé dans le tableau ci-dessous :

	Saison de chauffage	Saison de climatisation	Intersaison
Tout le temps fermés			
Tout le temps ouverts			
Complètement ouverts le matin et fermés l'après-midi			
Complètement fermés le matin et ouverts l'après-midi			
Partiellement ouverts suivant l'ensoleillement			

Tableau 20 : Modèle du questionnaire sur les données d'ouverture des systèmes d'occultation

Nous commençons donc par affecter les états des systèmes d'occultation suivant les réponses des occupants pour chaque saison et pour chaque partie de la journée :

- L'état complètement ouvert correspond à 0 % du système d'occultation
- L'état complètement fermé correspond à 90 % du système d'occultation
- L'état partiellement ouvert suivant l'ensoleillement correspond aux valeurs suivantes :

Apports solaires	0 – 200 W	200 – 300 W	>300 W
État des systèmes d'occultation	10 %	50 %	90 %

Tableau 21 : État des systèmes d'occultation suivant les apports solaires

Étant donné que l'ouverture des fenêtres est motivée par le besoin en lumière naturelle, nous considérons que l'état initial des systèmes d'occultation est l'état ouvert. Les motivations principales de fermeture sont la réduction de l'éblouissement sur l'écran et la réduction de la surchauffe par rayonnement solaire. Ainsi, nous nous basons sur les apports solaires afin de déterminer l'état de fermeture des systèmes d'occultation.

Pour cela, nous commençons par réaliser d'abord une première simulation thermique dynamique qui nous permet d'obtenir les apports solaires de chaque bureau. Ce résultat nous a permis de :

- Définir un seuil de surchauffe de 300 W.

- Définir les périodes de fermeture des systèmes d'occultation suite à la surchauffe du bureau.

En se basant sur tous ces éléments, nous générons les scénarios de systèmes d'occultation suivant la même logique que pour les fenêtres :

- L'état des systèmes d'occultation entre l'heure d'arrivée et 10h correspond à l'action effectuée par l'occupant.
- L'état des systèmes d'occultation entre 10h et 13h correspond à leur état le matin.
- L'état des systèmes d'occultation entre 14h et l'heure de départ correspond à l'état déclaré par l'occupant pour l'après-midi.
- Dans le cas où l'occupant déclare que les systèmes d'occultation sont ouverts suivant l'ensoleillement, nous affectons pour chaque pas horaire l'état des systèmes d'occultation suivant les apports solaires comme indiqué dans le **Tableau 21**.

Pour tous les cas précédemment cités, nous considérons une fermeture complète (90 %) des systèmes d'occultation à chaque fois que les apports solaires dépassent 300 W. L'état est de nouveau renseigné suivant les réponses des occupants une fois cette condition levée.

Nous simulons la consommation annuelle du bâtiment en se basant sur les scénarios cités précédemment afin de pouvoir établir une comparaison avec les consommations du bâtiment basée sur des données réelles de capteurs et de GTB.

3.1.4 *Simulation thermique dynamique à partir des données de capteurs*

Grâce aux données collectées de capteurs installés dans le bâtiment et les systèmes de GTB, nous réalisons une simulation thermique dynamique en vue de connaitre les consommations d'énergie du bâtiment.

Comme pour le cas du questionnaire, nous générons nos scénarios d'usage nécessaires pour la simulation thermique dynamique suivant les données collectées et des algorithmes simples.

- **Occupation**

En l'absence de capteurs de présence permettant de déterminer les heures de présence et d'absence des occupants dans les différents bureaux et afin de pouvoir générer un scénario d'occupation qui corresponde à l'usage d'énergie dans les bureaux, nous avons adopté les hypothèses suivantes pour exploiter les données de consommation de l'éclairage, des écrans et des ordinateurs :

- Entre 4h et 19h, en dehors de l'heure de la pause déjeuner, si l'ordinateur et l'écran sont tous les deux utilisés, l'occupant est présent dans le bureau.
- En dehors de la période entre 4h et 19h, et durant la pause de midi, l'occupant n'est pas présent dans le bureau.
- Si l'ordinateur ou l'écran fonctionnent l'un sans l'autre, l'occupant n'est pas présent dans le bureau.

- **Ouverture / Fermeture des fenêtres**

Les fenêtres du bâtiment sont dotées d'un contact de fenêtre permettant de remonter au système GTB l'information d'ouverture de fenêtre et le retour à la normal de son état fermé.

Nous utilisons les données enregistrées dans l'interface de la GTB afin de créer les scénarios d'ouverture et de fermeture des fenêtres des différents bureaux

- **Consignes de température**

Pour les scénarios de consignes de chauffage et de refroidissement, nous nous basons aussi sur les données de la GTB qui fournit la consigne de température de la salle avec un pas de temps à définir par l'utilisateur.

Pour des résultats plus précis, nous effectuons une première simulation thermique dynamique. Nous générons les vitesses des ventilateurs de soufflage : petite, moyenne ou grande vitesse. Nous calibrons sur ces résultats les consignes de chauffage afin de nous rapprocher au maximum des consommations réelles.

- **Éclairage et puissances dissipées :**

Les capteurs connectés utilisés retournent la puissance de l'appareil à chaque fois que cette dernière change. Nous pouvons donc collecter pour l'instant t, la nouvelle puissance P_t détectée par le capteur.

Nous calculons donc l'énergie $E_{\Delta t}$ consommée entre l'instant t_1 et t_2 en se basant sur la formule suivante :

$$E_{\Delta t} = P_{t_1} \times (t_2 - t_1)$$

Afin de générer les scénarios de puissances à chaque heure T, nous nous basons sur la formule ci-dessous :

$$E_T = \sum_{T \leq i < (T+1)} P_i \times (i - T) \qquad \text{(a)}$$

i étant les instants de changement de puissance compris entre l'heure T et l'heure T+1

Les scénarios d'éclairage se présentent sous forme de niveau d'éclairement en Lux pour chaque heure de l'année et non sous forme de puissances d'équipements d'éclairage par heure. La puissance des équipements d'éclairage est à définir pour chaque bureau en W/m^2 pour la totalité de la simulation. Pour des bureaux de 15 m^2 par exemple, nous définissons une puissance de 8 W/m^2 afin d'obtenir la puissance totale de 120 W qui correspond à la puissance des luminaires installés dans ce type de bureaux.

Afin de pouvoir générer les scénarios d'éclairage qui correspondent aux consommations réelles du bâtiment, nous affectons donc une valeur d'éclairement de 500 Lux à chaque fois que le luminaire est allumé, et une valeur de 0 Lux dans le cas contraire. La puissance à chaque heure T dans le local dans le cas où le luminaire est allumé est la suivante :

$$P_T = \text{Puissance par m}^2 \times \text{Surface du local} \qquad \text{(b)}$$

Nous ne nous basons pas bien entendu sur une étude de l'éclairage naturel, vu que nous connaissons les consommations de l'éclairage. La valeur de l'éclairement a pour but de préciser si l'éclairage est allumé ou non dans le local.

Afin de définir les heures pendant lesquelles l'éclairage est allumé et celles pendant lesquelles ce dernier est éteint nous établissons l'hypothèse suivante :

Si la consommation totale d'éclairage pour l'heure T représente 75 % ou plus de la consommation du luminaire pendant une heure complète de fonctionnement, le luminaire est considéré à 100 % allumé pendant cette heure T. Dans le cas contraire, il est considéré éteint.

- **Puissances dissipées :**

Pour générer les scénarios de puissance dissipée, nous nous basons sur le calcul de la formule (a) ci-dessus de l'énergie pour chaque heure qui nous permet de déduire la valeur de la puissance à affecter à chaque heure pour les scénarios de puissance.

4 *Résultats et comparaison*

Nous avons réalisé dans ce qui précède des simulations de la consommation annuelle du bâtiment en considérant un cas de base dont les scénarios sont déterministes et généraux. Ensuite nous avons simulé les consommations annuelles du même bâtiment en nous basant une première fois sur les données issues des réponses au questionnaire que nous avons soumis aux occupants du bâtiment. Enfin, nous nous sommes basés sur les données issues des capteurs installés dans le bâtiment et sur les données du système de GTB pour effectuer une troisième simulation. Dans ce qui suit nous présentons un récapitulatif des données utilisées dans chaque cas et une analyse des résultats obtenus par simulation thermique dynamique.

4.1.1.1 *Récapitulatif des données d'entrée :*

Nous récapitulons dans le (**Tableau 22**) les différentes données d'entrée sur lesquelles se sont basés nos différents cas de référence étudiés.

	Cas de base	Questionnaire	Données
Occupation	Méthode Th-BCE relatifs à l'usage de bureaux.	Suivant l'heure d'arrivée et de départ des occupants et le temps qu'ils passent dans le bureau	Suivant l'usage des équipements de bureaux basé sur la collecte de données
Chauffage	Tout le temps 22,5 °C	Suivant le ressenti de l'occupant relaté par le questionnaire	Suivant les données de la GTB
Climatisation	Tout le temps 23 °C	Suivant le ressenti de l'occupant relaté par le questionnaire	Suivant les données de la GTB
Éclairage	De 7h à 18h pour toutes les pièces sauf couloirs de 7h à 20h	Suivant les réponses des occupants	Suivant les données collectées par les capteurs intelligents
Fenêtres	Tout le temps fermées	Suivant les réponses des occupants	Suivant les données de la GTB
Portes	Tout le temps ouvertes	Suivant les réponses des occupants	Suivant les réponses des occupants
Systèmes d'occultation	Tout le temps ouverts	Suivant les réponses des occupants	Suivant les réponses des occupants
Puissances dissipées	Scénario général considérant un nombre d'équipements pour tous les bureaux	Suivant les réponses des occupants sur l'usage de ces équipements	Suivant les données collectées par les capteurs intelligents

Tableau 22 : Récapitulatif des données prises en considération pour l'établissement des différents types de cas de base

4.1.1.2 *Comparaison des consommations et écart de performance*

Nous effectuons dans les mêmes conditions de simulation, une simulation annuelle des consommations d'énergie des trois cas précédemment décrits. Nous représentons la comparaison de ces résultats dans la **Figure 38**.

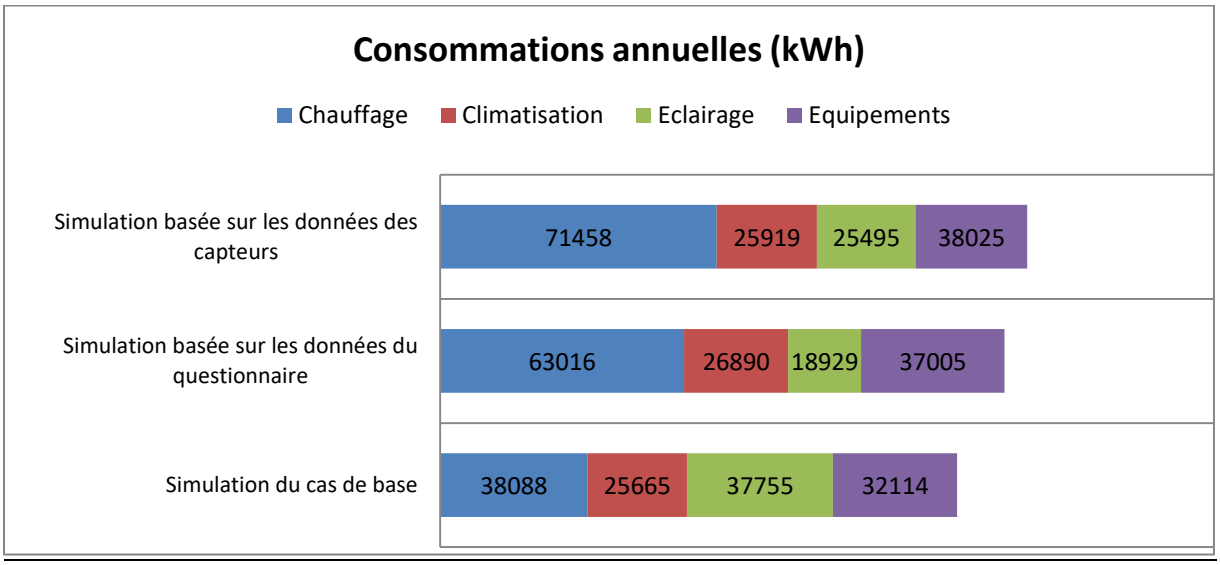


Figure 38 : Comparaison des consommations annuelles des différents cas de référence

Nous pouvons constater un écart dans les consommations annuelles entre ces trois simulations. Ces différences peuvent s'expliquer par ce qui suit :

- Les consommations de chauffage sont associées aux données suivantes : l'occupation, les consignes de chauffage, les ouvertures de fenêtres et de portes, les systèmes d'occultation et les puissances dissipées. Plus ou moins d'occupation dans les bureaux affecte les apports internes en chaleur et donc les besoins en chauffage. Dans le cas réel basé sur les données de capteurs, les consignes de chauffage sont plus importantes que la valeur moyenne définie dans le cas de simulations sans données de capteurs ou de questionnaire ce qui engendre plus de consommations en chauffage. La prise en compte des ouvertures de porte et de fenêtres permet de simuler les pertes de chaleur dues aux actions des occupants sur les ouvertures. La fermeture des stores réduit aussi les gains en chauffage par rayonnement solaire ce qui nécessite plus de chauffage mais permet aussi d'éviter la nuit les déperditions de chaleur ce qui permet de réduire la consommation en chauffage. Finalement, plus les appareils électriques sont utilisés, plus le bureau est chauffé par la chaleur dissipée par effet joule.
- Dans le cas de la climatisation, les différences notées sont faibles. Elles sont dues aux consignes de climatisation dont les valeurs collectées par GTB se rapprochent de la valeur moyenne considérée dans le premier cas de base. La différence notée entre les simulations basées sur les réponses au questionnaire et celles basées sur les données de capteurs est due aux ouvertures de fenêtres et à la puissance des appareils électriques utilisés.
- Dans le premier cas de simulation standard, nous considérons une consommation maximale pour l'éclairage compte tenu de l'hypothèse où tous les luminaires sont allumés sur des heures fixes d'occupation. Les simulations basées sur les réponses au questionnaire et celles basées sur les données des capteurs permettent de tenir compte de l'usage non continu de l'éclairage par certains occupants ou du recours à l'éclairage naturel, ce qui explique les consommations plus faibles dans ces deux cas par rapport au

premier. Nous remarquons aussi que les informations avancées par les réponses des occupants au questionnaire sous-estiment l'usage de l'éclairage en particulier et l'énergie dans le bâtiment en général.
- Les consommations des appareils électriques dans les bureaux mesurées par les capteurs sont plus importantes que celles annoncées par les occupants ou estimées dans le cas standard.

Nous déduisons à partir des résultats de simulation de ce premier travail du cas de base les conclusions suivantes :

- La prise en considération de données plus réalistes concernant le comportement des occupants mène à des résultats plus précis.
- La généralisation des scénarios d'occupation et d'usage du bâtiment conduit à l'écart de performance et les consommations réelles du bâtiment sont donc prédites partiellement.
- Le chemin inverse peut être entrepris. Une réduction des consommations d'énergie peut être atteinte en faisant adopter aux occupants le comportement favorable qui génère le moins de consommations d'énergie, qui peut d'ailleurs aussi être pris en considération lors de la phase de conception.

Nous allons justement étudier l'effet du comportement des occupants sur la consommation énergétique dans la suite de ce travail.

4.1.1.3 *Analyse d'incertitude*

D'après la documentation du logiciel Pleiades+Comfie, la définition des usages des pièces dans le logiciel permet au module AMAPOLA de proposer différents scénarios d'occupation adaptés aux typologies des pièces pour permettre :

- Une analyse d'incertitude : quantifier le risque quant à la mise en place d'une cible énergétique.
- Une analyse de sensibilité : pour déterminer les paramètres les plus influents.
- Des calculs d'optimisation : algorithme génétique pour déterminer le meilleur compromis entre coût d'investissement, coût d'exploitation, consommation énergétique, confort, niveau réglementaire et bilan environnemental tout en minimisant les temps de calcul.

L'analyse d'incertitude permet de tenir compte des comportements des occupants. En effet, les scénarios d'usage prédéfinis ne permettent pas de rendre compte de la diversité des manières d'habiter et d'utiliser les bâtiments. AMAPOLA permet de créer des scénarios d'usage suivant des comportements réalistes basés sur des profils suivants les données entrées par les utilisateurs. Les occupants pris en compte modifient les consignes de chauffage et leur façon d'utiliser les équipements. Le module réalise une multitude de simulations avec des données d'entrée qui varient, ce qui permet de calculer la probabilité de distribution des sorties jusqu'à la convergence du modèle.

Il est important avant d'utiliser le module de comprendre son fonctionnement et d'identifier les systèmes concernés par l'analyse d'incertitude.

D'après la documentation, les scénarios stochastiques générés par les occupants virtuels suivant les pièces du bâtiment concernent :

- L'occupation.

- Les consignes de chauffage dans le résidentiel uniquement.
- Les puissances dissipées dont les puissances d'éclairage. AMAPOLA ne tenant compte de l'éclairement naturel que pour le tertiaire, les consommations générées dans ce cas dépendent de l'occupation effective des pièces et la puissance des équipements d'éclairage.
- Les ouvertures de fenêtres.
- Les systèmes d'occultation avec la possibilité de les activer.

Le module AMAPOLA permet aussi de générer les scénarios moyens qui représentent la moyenne de plusieurs itérations de calcul avec des scénarios stochastiques. Les scénarios moyens ne sont pas générés pour les ouvertures et les systèmes d'occultation puisque ces derniers dépendent des conditions extérieures et ne peuvent pas être déterminées au préalable mais à travers des itérations entre le module et les données extérieures.

Nous effectuons une analyse d'incertitude sur le cas de base afin de vérifier les résultats obtenus. Pour cela il faut d'abord définir la variabilité du modèle à travers, soit des lois de distribution uniformes, soit des lois de distribution uniformes tronquées. Il est possible d'appliquer la variabilité sur :

- Les matériaux.
- Les parois.
- Les portes et les fenêtres.
- Les ponts thermiques.
- La ventilation.
- Certains scenarios dont ceux liés à l'occupant : les consignes de température, les scénarios d'occupation, les puissances dissipées, les scénarios des systèmes d'occultation, le système ECS.
- L'efficacité des systèmes.

Ensuite pour l'analyse d'incertitude, il faut définir le modèle de l'occupant. Pour cela, et dans le cas du tertiaire, il faut indiquer :

- La densité d'occupation des pièces.
- Les horaires d'occupation avec la possibilité d'indiquer le pourcentage d'occupants.
- Les consommations électriques liées à cette occupation avec la possibilité d'indiquer le type d'équipements.

Nous commençons par affecter des scénarios stochastiques à l'ensemble des scénarios afin de l'utiliser avec le module AMAPOLA. Nous nous basons sur les données du questionnaire pour définir la variabilité des scénarios. Nous souhaitons accorder à tous les scénarios la même probabilité d'occurrence, nous utilisons donc pour cela la distribution uniforme tronquée.

- <u>Consignes de température</u>

En observant les données retournées par la GTB, nous supposons trois scénarios différents en ce qui concerne les consignes de températures que nous résumons dans le (Tableau 23).

Variabilité	**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 3**
Système de chauffage	Allumé tout le temps (consigne fixée par l'occupant)	Allumé de 8h à 19h et éteint après 19h (consigne fixée par l'occupant)	Consigne de 23,5 °C de 8h à 19h et 16° C après 19h

Tableau 23 : Variabilité des scénarios du système de chauffage

Pour les consignes fixées par les occupants, nous supposons une variation de consignes de température entre 19 °C et 24,5 °C pour le chauffage et entre 23 °C et 26 °C pour la climatisation.

- Occultation

Nous considérons dans le cas des systèmes d'occultation tous les scénarios d'ouverture par les occupants à travers le questionnaire et que nous résumons dans le (**Tableau 24**) ci-dessous :

	Saison de chauffage	Saison de climatisation	Intersaison
Tout le temps fermés	2 %	5 %	2 %
Tout le temps ouverts	48 %	37 %	38 %
Ouverts le matin, fermés l'après-midi	0 %	0 %	0 %
Fermés le matin, ouverts l'après-midi	5 %	7 %	7 %

Tableau 24 : Variabilité des scénarios d'ouverture des systèmes d'occultation suivant les saisons

Nous considérons une variabilité d'ouverture entre 20 % et 80 %

- Occupation

Pour ce qui est du modèle d'occupation, nous nous basons sur les réponses au questionnaire afin de définir les heures d'occupation par pourcentages dans le bâtiment comme le montre le (**Tableau 25**).

Heures d'occupation	Pourcentage des occupants
7h -> 16h	2 %
8h -> 16h	18 %
8h -> 17h	8 %
9h -> 16h	18 %
9h -> 17h	20 %
9h -> 18h	24 %
10h -> 18h	10 %

Tableau 25: Pourcentage d'occupation des pièces du bâtiment suivant les heures de la journée

- Équipements électriques

Nous définissons aussi les pourcentages d'utilisation des différents équipements électriques suivant les données collectées à travers les réponses au questionnaire. Le (Tableau 26) ci-dessous résume ces pourcentages.

Ordinateur fixe avec 2 écrans	37 %
Ordinateur fixe avec 1 écran	23 %
Ordinateur portable avec 1 écran	40 %

Tableau 26 : Pourcentage globale d'utilisation des équipements électriques dans les différents bureaux

En se basant sur ces données, nous obtenons les résultats suivants, à travers l'analyse d'incertitude sur les différents systèmes.

Pour le système de chauffage, l'analyse d'incertitude donne des consommations annuelles qui varient de 31 392 kWh à un maximum de 52 302 kWh avec une moyenne de 41 755 kWh (**39**). Les consommations annuelles estimées pour le chauffage en se basant sur les données du questionnaire et des capteurs dépassent donc cet intervalle. Ceci s'explique par le fait que

beaucoup d'occupants choisissent des consignes de température élevées contrairement à la moyenne considérée.

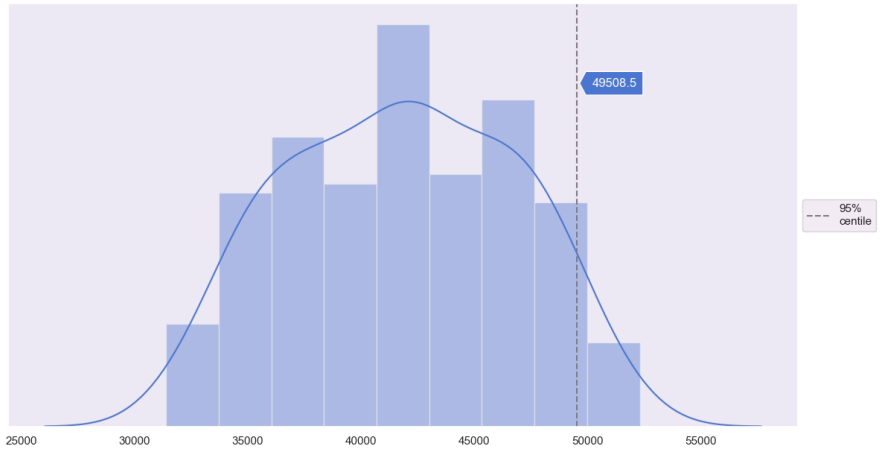


Figure 39 : Distribution des consommations électriques annuelles du système de chauffage en kWh

Pour le système de climatisation, les consommations annuelles varient entre 14 614 kWh et 23 575 kWh avec une moyenne de 18 653 kWh (**Figure 40**). Les valeurs obtenues en simulant les trois cas du bâtiment se rapprochent plus des valeurs maximales de cet intervalle.

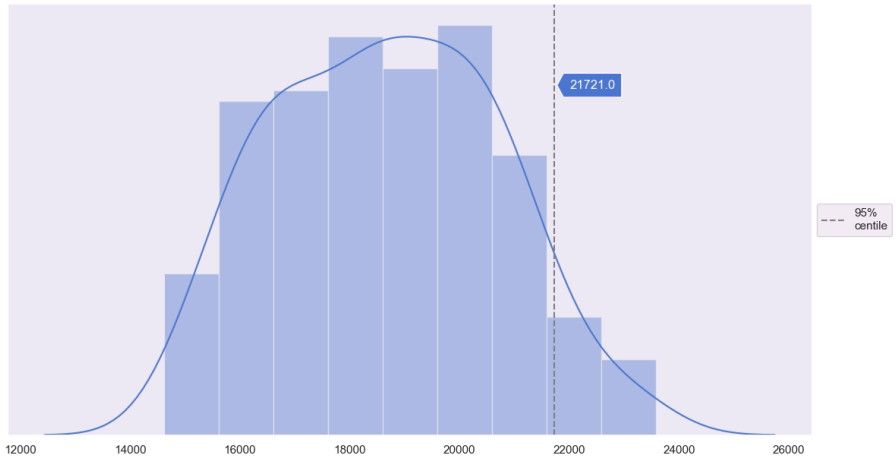


Figure 40 : Distribution des consommations électriques annuelles du système de climatisation en kWh

En ce qui concerne le système d'éclairage, nous obtenons un intervalle compris entre 14 808 kWh de consommation annuelle et 24 752 kWh. La moyenne est de 20 657 kWh (**Figure 41**). Les consommations simulées à partir des données issues des capteurs représentent le maximum des valeurs de cette distribution. Dans le cas des consommations liées à l'utilisation des équipements électriques, les consommations simulées pour les trois cas précédemment cités sont supérieures à la moyenne de la distribution des consommations (**Figure 42**).

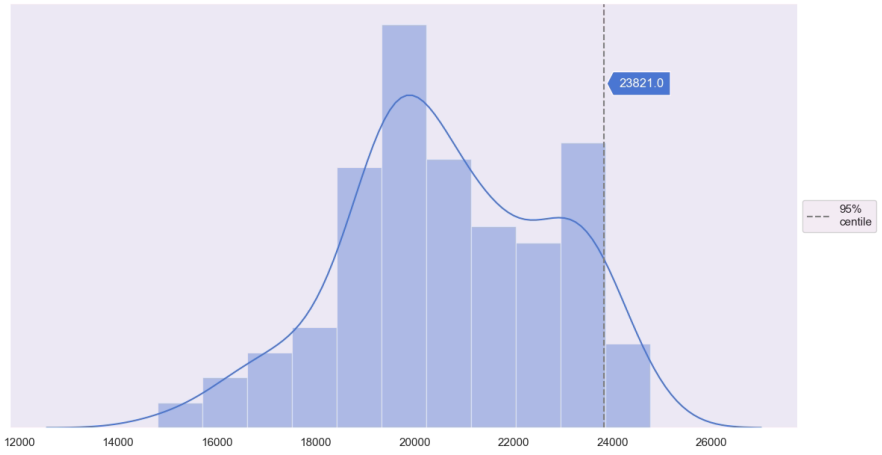


Figure 41 : Distribution des consommations électriques annuelles du système d'éclairage en kWh

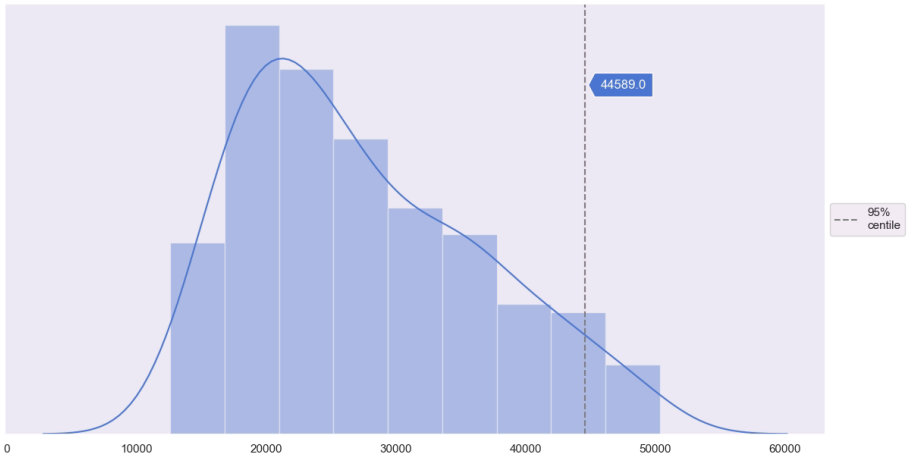


Figure 42 : Distribution des consommations électriques annuelles des équipements électriques en kWh

Nous nous retrouvons donc dans le cas d'un bâtiment où les comportements des occupants s'orientent plus vers des consommations élevées d'énergie. Un pourcentage élevé des occupants n'adoptent pas les écogestes. Pour autant, nous pouvons considérer ce cas d'étude comme un socle intéressant de la quantification l'impact du changement des comportements des occupants sur la consommation totale d'énergie dans ce bâtiment.

5 *Quantification de l'impact du changement de comportement par simulation thermique dynamique*

Afin de quantifier l'impact des écogestes sur la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment étudié, nous utilisons la possibilité d'importer des scénarios dans la bibliothèque du logiciel Pleiades + Comfie. L'objectif du travail est de transcrire les écogestes possiblement adoptables dans le bâtiment sous forme de scénarios de chauffage, de refroidissement, d'éclairement, de puissances dissipées, d'ouvertures de fenêtres et d'occultations. Suivant les températures extérieures et les scénarios d'occupation, nous pouvons également traduire les différents écogestes sous formes de scénarios qui varient tout au long de l'année afin de pouvoir quantifier leur impact.

Au vu des résultats obtenus précédemment en ce qui concerne le cas de base de l'étude et afin de mieux quantifier l'impact de l'adoption des écogestes dans le bâtiment, nous définissons un cas de base avec les comportements les plus défavorables recensés par le questionnaire pour l'utilisation des systèmes de chauffage, de climatisation, d'éclairage et les équipements électriques et ce pour la totalité des bureaux. Nous gardons cependant les mêmes scénarios d'occupation définis par les données des capteurs propres à chaque bureau.

5.1.1 *Outil pour la création des scénarios de comportement des occupants*

Le logiciel Pleiades + Comfie permet d'importer un ou plusieurs scénarios disponibles sous forme de table formatée. Compte tenu du nombre important de bureaux et de scénarios à générer qui dépendent à leur tour d'un nombre important de fichiers d'entrée, il s'est avéré indispensable de développer une plateforme permettant de générer sous forme de tableurs adaptés au format recommandé par le logiciel, les différents scénarios d'usage. Cette plateforme permet de :

- Définir le nombre et le nom des zones du bâtiment.
- Importer une base des données d'entrée nécessaires pour générer les scénarios d'usage : températures extérieures, températures intérieures, scénario d'occupation, niveau d'éclairement.
- Afficher les données d'entrée pour vérification.
- Définir des règles de génération des différents scénarios qui dépendent des données d'entrées et des conditions suivantes : heure, saisons, horaires de travail.
- Créer des groupes de comportement basés sur la liste des règles prédéfinies.
- Affecter les groupes de comportement aux bureaux souhaités.
- Générer les tables compatibles avec le logiciel pour les différents scénarios d'usage.

Afin de faciliter son usage, la plateforme permet également :

- Une importation des données suivant plusieurs formats de fichiers : xls, xlsx, csv, txt.
- La possibilité de définir le préfixe des fichiers avant le nom des zones afin de faciliter l'importation des fichiers d'entrée relatifs à chaque zone.
- La possibilité de dupliquer la table des données d'entrée pour en créer d'autres et pouvoir les modifier.

Nous souhaitons dans le cadre de notre étude étudier différents cas de changement de comportements dans les différents bureaux. L'interface développée nous permet donc d'affecter pour chaque bureau le niveau de comportement souhaité. Afin de choisir une affectation aléatoire des niveaux de comportement pour les différents bureaux suivant un pourcentage défini.

Dans un souci de généralisation, et compte tenu du fait que la définition des comportements repose sur les réponses d'un échantillon limité d'occupants, l'interface permet de changer les paramètres de définition des différents écogestes dont l'impact sera étudié dans les parties qui vont suivre. Un tel souci de généralisation va permettre, à travers notre plateforme, à de futures études de définir de nouvelles variations de comportements à partir de conditions liées à différents paramètres tels que la température, les saisons, l'occupation, etc. et de générer les scénarios correspondants sous le format souhaité afin de les utiliser pour des simulations thermiques dynamiques ou des analyses de données.

5.1.2 *Impact de l'adoption des écogestes dans le bâtiment*

En se basant sur les travaux de littératures concernant les écogestes à adopter dans les bureaux (Obaidellah et al., 2019c) (D. Li et al., 2019a) (Oppong-Tawiah et al., 2020) (Eco-responsable au bureau, ADEME, 2020) (He et al., 2021), nous avons dressé une liste de ces écogestes par système (**Tableau 27**) à intégrer dans notre démarche de changement de comportements et pour lesquels nous étudierons, par simulation thermique dynamique, l'impact sur la totalité de la consommation du bâtiment.

	Eco-geste	**Avant**	**Après**	**Simulation**
Chauffage	Éteindre le chauffage une heure avant de quitter le bureau	Le chauffage est allumé jusqu'à 18h	Le chauffage est éteint une heure avant de quitter le bureau	Scénario de chauffage suit scénario d'occupation
	Éteindre le chauffage quand la fenêtre est ouverte	Les fenêtres sont parfois ouvertes quand le chauffage est allumé	Le chauffage est éteint à chaque fois que les fenêtres sont ouvertes	Scénario d'ouverture des fenêtres suit scénario chauffage
	En hiver, la nuit, baisser les volets roulants des fenêtres pour réduire les déperditions de chaleur	Les volets ne sont jamais baissés le soir en hiver dans les bureaux	Les volets sont toujours baissés le soir en hiver dans les bureaux	Scénarios d'ouverture ou de fermeture des systèmes d'occultation lors des heures d'inoccupation
	Fermer les portes de communication avec les espaces mal chauffés ou non chauffés	Portes de communication toujours ouvertes	Portes de communication toujours fermées	Scénario fermetures des portes
Climatisation	Préconiser la ventilation au lieu de la climatisation	Climatisation quotidienne 23 °C	Ouverture des fenêtres le matin en été système de ventilation	Scénario d'ouverture des fenêtres lors des heures matinales en été
	Fermeture de fenêtres dès que T° Ext > T° Int	Fenêtres ouvertes toute la journée	Fenêtres ouvertes suivant température extérieure	Scénarios d'ouverture des fenêtres suivant la température extérieure
	Couper la climatisation une heure avant de quitter le bureau	Climatisation activée de 8h à 18h	Climatisation éteinte quand le bureau n'est pas occupé	Climatisation suivant l'occupation
	En été, ouvrir les fenêtres la nuit	Les fenêtres sont toujours fermées	Les fenêtres sont toujours ouvertes	Scénario ouverture des fenêtres en été le soir
Éclairage	Éteindre les lumières en quittant la pièce	Éclairage allumé de 8h à 20h	Lumières éteintes à chaque fois que la pièce est quittée	Éclairage qui suit le scénario d'occupation
	Éteindre dès que la luminosité est meilleure	Éclairage allumé de 8h à 20h	Lumières éteintes en fonction de la luminosité	Éclairage qui suit le niveau de luminosité de la pièce
Équipements électriques	Mettre les ordinateurs en veille en s'absentant	Ordinateurs allumés en cas d'absence de l'occupant au cours de la journée	Ordinateurs en veille en cas d'absence de l'occupant au cours de la journée	Scénarios de puissance qui suivent le scénario d'occupation
	Éteindre les équipements électriques en cas de	Équipements électriques tout le temps allumés	Équipements électriques éteints en cas de non-usage	Scénarios de puissance qui suivent le scénario d'occupation

	non-usage			
	Consommer au minimum l'énergie lors de l'usage des appareils électriques. Exemple : Chauffer la quantité nécessaire d'eau seulement dans la bouilloire	Utilisation maximum de l'énergie par les équipements électriques	Réduction de l'énergie utilisée par les équipements électriques	Scénarios de puissance des équipements électriques

Tableau 27 : Récapitulatif des écogestes à appliquer dans les bâtiments de bureaux
Inspiré de : Eco-responsable au bureau, ADEME, 2020

Afin de représenter l'impact de l'adoption des écogestes dans le bâtiment, nous effectuons une multitude de simulations thermiques dynamiques en faisant varier les éléments ci-dessous :

- Le poste de consommation : nous investiguons de façon indépendante l'impact de l'amélioration des comportements dans chacun des postes de consommations : chauffage, climatisation, éclairage, équipements électriques.
- Le type d'écogestes dans chaque poste : les écogestes étudiés sont listés et simulés de façon à aller du plus facile à adopter au plus difficile à adopter.
- Le pourcentage d'adoption des écogestes : nous étudions l'impact de la variation du pourcentage d'adoption des écogestes des différents postes de 0 % à 100 % avec un pas de variation de 10 %.

Nous attribuons de manière aléatoire les écogestes choisis aux différents bureaux suivant le pourcentage d'adoption considéré. Au lieu d'effectuer une seule affectation, ce qui ne représente pas la totalité des cas et ne tient pas compte des différences entre les différentes pièces (orientation, emplacement dans le bâtiment, nombre d'ouvrant, etc.) ; nous proposons un nombre de quatre attributions aléatoires, ce qui permet d'obtenir des résultats variés et se rapprocher de la réalité. Ainsi, nous obtenons pour chaque cas quatre fichiers différents à simuler.

Nous attribuons de manière aléatoire les écogestes choisis aux différents bureaux suivant le pourcentage d'adoption considéré. Par exemple, si un pourcentage de 10 % correspond à 5 bureaux, le choix de ces bureaux pour leur affecter les écogestes se fait de façon aléatoire. Au lieu d'effectuer une seule affectation, ce qui ne représente pas la totalité des cas et ne tient pas compte des différences entre les différentes pièces (orientation, emplacement dans le bâtiment, nombre d'ouvrant, etc.), nous proposons quatre attributions aléatoires, ce qui permet d'obtenir des résultats variés et de se rapprocher de la réalité. Ainsi, nous obtenons pour chaque cas quatre fichiers différents à simuler.

Nous présentons ci-dessous les écogestes de chaque poste de consommation et les résultats de leur application dans le bâtiment sur la consommation d'énergie totale.

5.1.2.1 *Chauffage*

Nous simulons pour le cas du système de chauffage l'impact des écogestes suivants. Nous les organisons suivant des combinaisons d'écogestes (**Tableau 28**) :

Combinaison écogestes 1	- Consigne de chauffage de 23 °C - Éteindre le chauffage au départ de l'occupant
Combinaison écogestes 2	- Consigne de chauffage de 22 °C - Éteindre le chauffage au départ de l'occupant - Éteindre le chauffage une fois la fenêtre ouverte

Combinaison écogestes 3	- Consigne de chauffage de 21 °C - Éteindre le chauffage une heure avant le départ de l'occupant
Combinaison écogestes 4	- Consigne de chauffage de 21 °C - Éteindre le chauffage une fois la fenêtre ouverte - Baisser les stores en quittant le bureau
Combinaison écogestes 5	- Consigne de chauffage de 20 °C - Éteindre le chauffage au départ de l'occupant
Combinaison écogestes 6	- Consigne de chauffage de 20 °C - Éteindre le chauffage une heure avant le départ de l'occupant - Éteindre le chauffage une fois la fenêtre ouverte - Baisser les stores en quittant le bureau

Tableau 28 : Différents écogestes concernant le système chauffage dont l'impact est à investiguer

Nous constatons qu'un premier effort d'écogestes (combinaisons écogeste 1) de la part des occupants peut mener à 1 % de réduction de consommation d'énergie pour 10 % d'implication. Une implication totale de la part des occupants mène quant à elle à 35 % de réductions de consommations d'énergie (**Figure 43**).

Dans le cas où les occupants s'impliquent dans des écogestes plus avancés (écogestes 6), les réductions de consommation d'énergie sont estimées à 4 % pour 10 % de participation, 24 % pour 50 % de participation et 61,5 % pour une implication totale des occupants (**Figure 43**).

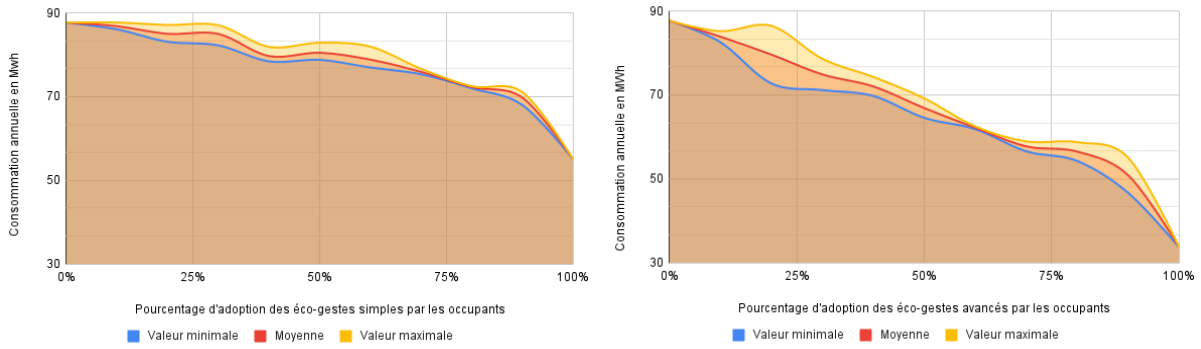


Figure 43 : Variation des consommations annuelles d'énergie du chauffage dans le bâtiment suivant le pourcentage d'adoption des éco-gestes. Cas d'écogestes simples (figure à gauche) et d'écogestes plus avancés (figure à droite)

Pour les différents autres écogestes (écogestes 2, écogestes 3, écogestes 4, écogestes 5), les consommations d'énergie annuelles montrent le potentiel de réduction des consommations d'énergie en agissant sur le comportement des occupants (Figure 44). Nous remarquons un rapprochement entre les consommations de certains écogestes. Ceci nous permet d'avoir une idée sur les actions qui peuvent avoir plus d'impact que d'autres. Par exemple, la différence entre les consommations de la combinaison d'écogestes 5 et celles des écogestes 6 ne dépassent pas 5 %. Ces deux écogestes possèdent la même consigne de température. La différence réside dans le fait d'éteindre le chauffage une heure avant le départ de l'occupant, de baisser les stores la nuit, et d'éteindre le chauffage à chaque fois la fenêtre est ouverte. Entre la combinaison d'écogestes 3 et la combinaison d'écogestes 4, où la consigne de température est la même, et que le chauffage est éteint une heure avant le départ de l'occupant, avec la différence que dans le cas de la combinaison d'écogestes 4, les stores sont baissés la nuit et le chauffage éteint en cas d'ouverture des fenêtres, la différence de consommations ne dépassent pas 3 %. Nous remarquons aussi que le fait de baisser la consigne de chauffage d'un degré implique des

réductions importantes de consommations surtout dans le cas d'une implication importante de la part des occupants.

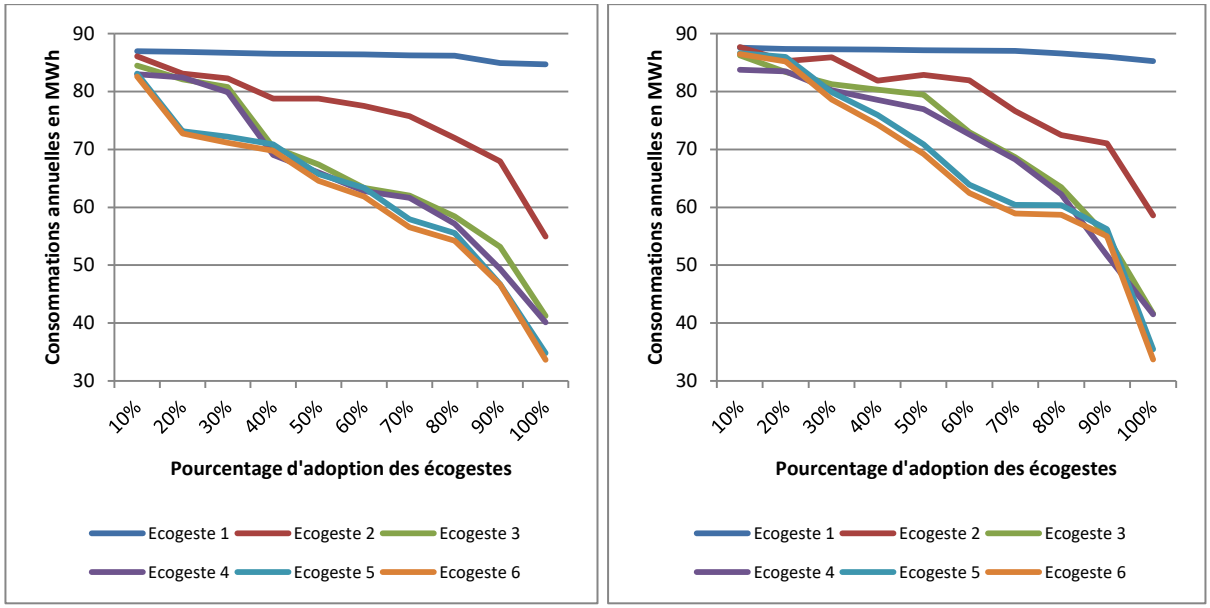


Figure 44 : Consommations énergétiques annuelles du chauffage suivant les écogestes et les pourcentages de leur adoption. À gauche, les valeurs minimales et à droite les valeurs maximales obtenues par STD

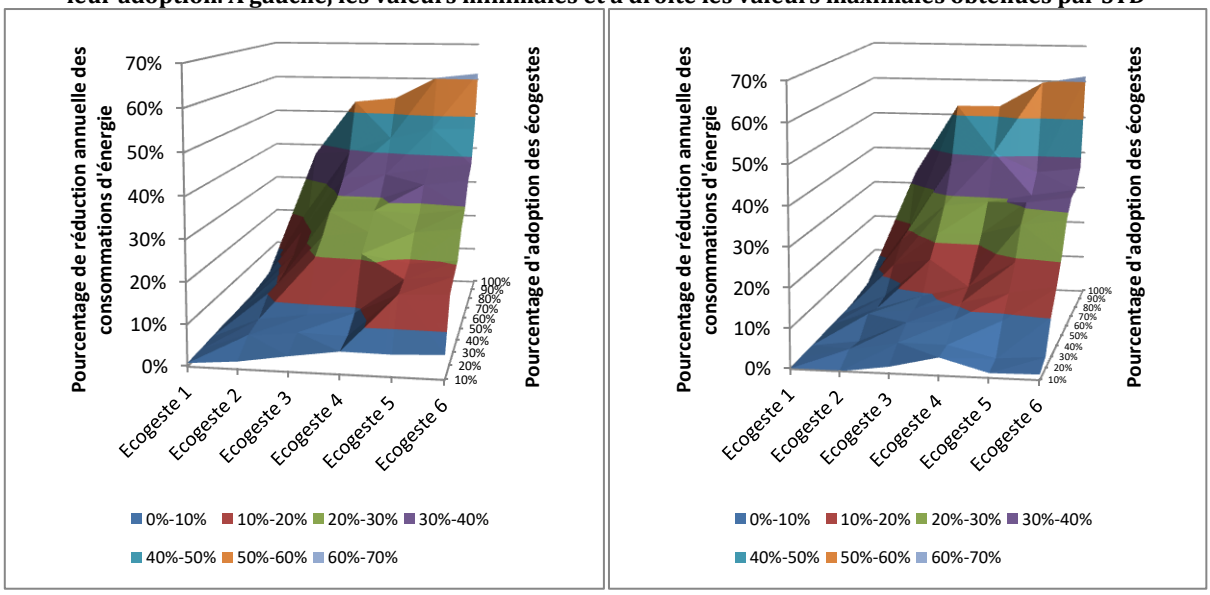


Figure 45 : Réductions de consommations d'énergie annuelles correspondantes aux différents écogestes

En représentant et en analysant les réductions de consommations d'énergie possibles à travers les écogestes de chauffage (**Figure 45**), nous tirons les conclusions suivantes :

- Les réductions de consommations d'énergie obtenues grâce à une implication totale des occupants dans des écogestes moins impactants sont parfois équivalentes aux réductions obtenues avec l'implication de la moitié des occupants dans des écogestes plus impactants. La combinaison d'écogestes 4 par exemple permet avec 50 % seulement d'implication d'obtenir un peu plus de réductions de consommations (24,7 %) qu'avec une implication à 90 % de la combinaison d'écogestes 2 (22,52 %).

- Nous remarquons des différences entre les réductions obtenues entre les différentes répartitions des écogestes sur les différents bureaux. Ceci peut s'expliquer par l'impact de certains paramètres propres à chaque bureau, de par son orientation ou les scénarios d'occupation de ses occupants qui influent les réductions de consommations possibles. Ces différences peuvent aller jusqu'à 6 %. Pour le même pourcentage d'implication de la part des occupants avec des bureaux différents, nous pouvons obtenir des réductions de consommations différentes.
- Le changement des consignes de températures et l'arrêt du chauffage avant le départ des occupants représentent les écogestes les plus impactants. Les réductions de consommations dans ce cas peuvent atteindre jusqu'à 35 %. Cependant, des petits gestes comme ne pas ouvrir les fenêtres lors du fonctionnement du chauffage ou fermer les stores la nuit, peuvent conduire à des réductions de consommations équivalentes à celles du changement de consignes dans quelques bureaux si l'implication est totale (impact allant de 2 % à 6 %).

5.1.2.2 *Éclairage*

Dans le cas du système d'éclairage, nous comparons les réductions de consommation d'énergie liées à l'adoption des deux écogestes suivants :

- Ecogeste 1 : L'occupant allume l'éclairage en arrivant au bureau et l'éteint en le quittant.
- Ecogeste 2 : L'occupant éteint l'éclairage à chaque fois qu'il quitte le bureau ou quand le niveau de luminosité est suffisant.

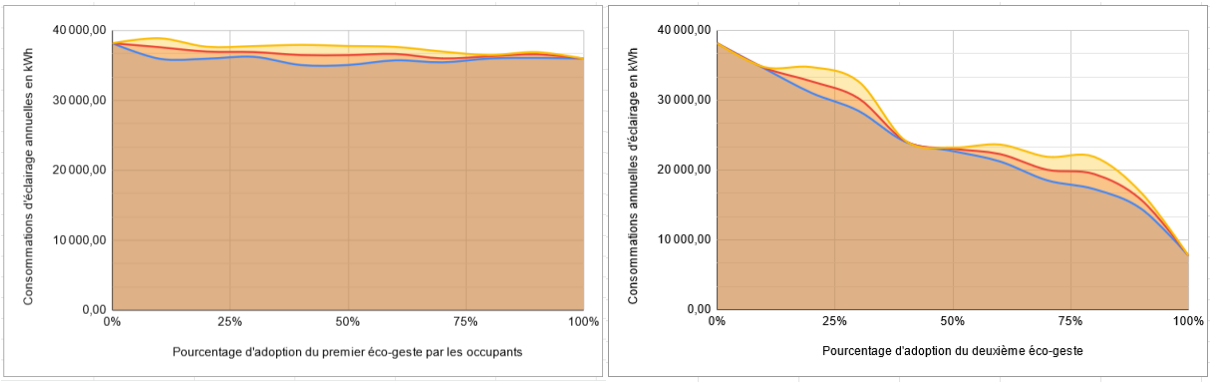


Figure 46: Variation des consommations annuelles d'énergie de l'éclairage dans le bâtiment. À gauche, pour l'écogeste 1 et à droite pour l'écogeste 2

L'écogeste 1 permet des réductions de consommation d'éclairage annuelles de 5,7 % par rapport au cas de base, ce qui est inférieur aux réductions possibles avec seulement une implication de 10 % des occupants dans l'écogeste 2, permettant 9 % de réduction de consommations d'énergie. Une adoption maximale de la part de tous les occupants de l'écogeste 2 peut mener jusqu'à 80 % de réductions de consommations d'énergie due à l'éclairage.

5.1.2.3 *Adoption de la totalité des écogestes :*

En appliquant la totalité des écogestes sur la totalité des bureaux du bâtiment, on arrive à représenter les gains d'énergies possibles par rapport au cas de base (**Figure 47**). Ces réductions de consommation impliquent certes un engagement quotidien de la part de la totalité des occupants mais sont importantes pour représenter les gains en énergie possibles si une démarche de changement de comportement était mise en place dans les bâtiments.

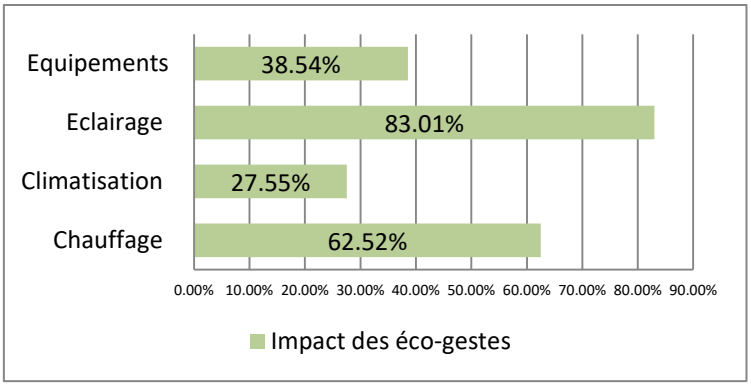


Figure 47: Pourcentage de réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment par adoption totale de tous les écogestes

Ces résultats demeurent cependant théoriques, car il n'est pas garanti que tout le monde les adopte. Afin de passer à une approche plus concrète, nous envisageons dans la partie suivante l'exploration de différentes combinaisons de comportements des occupants, en prenant en compte leurs choix individuels. Pour faciliter cette analyse, nous avons mis au point une plateforme dédiée qui permet d'introduire divers paramètres liés à l'occupant et au bâtiment. De plus, nous utilisons des modèles d'occupation stochastiques pour mieux comprendre les modèles d'utilisation des bâtiments et les comportements des occupants.
En adoptant cette approche pratique, notre objectif est d'évaluer de manière plus réaliste les possibilités de réduction de la consommation d'énergie.

5.1.3 *Niveaux de comportement*

Dans une optique de changement et d'amélioration du comportement des occupants dans les bâtiments, certains travaux se sont intéressés à comparer un comportement extrêmement économe en énergie avec un comportement très énergivore afin de faire ressortir les réductions d'énergie possibles par changement de comportement dans le bâtiment (voir Partie 3.3 du chapitre II). D'autres points d'améliorations permettant de dépasser les limitations de ces travaux ont été adoptés dans le cadre de notre étude :

- Les niveaux de comportements étudiés sont restreints à deux niveaux : un niveau parfait et un niveau énergivore. Ces deux niveaux étant extrêmes, ils ne permettent pas d'avoir une vision sur l'impact du changement de comportement sur les consommations énergétiques. En effet, la mise en place de niveaux intermédiaires de comportement permet de dresser une échelle d'évolution quant à l'atteinte des objectifs de réduction de consommation d'énergie à travers un changement de comportement qui s'exprime par le passage d'un niveau à un autre.
- La diversité des comportements des occupants est négligée lors de ces études. En effet, ces travaux considèrent des situations hypothétiques où tous les occupants adoptent tous le même comportement énergivore ou au contraire sont tous des consommateurs responsables d'énergie. La diversité des comportements dans un même bâtiment et l'impact d'un pourcentage d'occupants soucieux et insoucieux ne sont pas encore étudiés dans la littérature. Nous proposons dans le cadre de notre étude une multitude de cas dans lesquels l'impact du nombre d'occupants qui changent de comportement et leur emplacement dans le bureau est étudié.
- Les bases de la mise en place des niveaux de comportement sont totalement hypothétiques. En effet, en dehors des travaux de (Sun and Hong, 2017) qui se basent pour certains comportements sur des modèles afin de générer les probabilités

d'occurrence d'un comportement dans le cas parfait, les autres travaux considèrent des situations hypothétiques d'adoption de comportement qui ne correspondent pas obligatoirement aux situations réelles (voir Partie 3.3 du chapitre II). En se basant sur les réponses du questionnaire, nous proposons des niveaux différents et des probabilités d'occurrence de comportement issus de situations réelles.

Nous considérons dans le cadre de notre étude les quatre niveaux de comportement : Niveau 0, Niveau 1, Niveau 2 et Niveau 3. Le niveau 0 correspond au comportement le plus énergivore repéré à travers le questionnaire sur le comportement des occupants. Le niveau 3 représente le niveau le moins énergivore. Il regroupe tous les comportements qui visent à réduire les consommations d'énergie en tenant compte des possibilités d'action liées aux occupants, au bâtiment et aux libertés d'actions dont disposent les occupants lors de leurs interactions avec les systèmes du bâtiment.

Pour apporter plus de réalisme à ces différents niveaux de comportements, un calcul de probabilités d'occurrence a été effectué en se basant sur les réponses du questionnaire (Annexe 1). Nous présentons ci-dessous les différents scénarios tels qu'ils ont été simulés dans le logiciel Pleaides+Comfie afin de comparer l'impact des différents niveaux de comportements sur les consommations énergétiques dans le bâtiment.

5.1.3.1 *Scénario d'occupation*

Afin d'obtenir des résultats plus réalistes, nous nous basons sur les travaux de (Chen et al., 2018) pour générer un scénario d'occupation stochastique qui permette de dépasser l'aspect général et moins précis des scénarios déterministes. Comme nous l'avons démontré auparavant, il est difficile à partir de scénarios déterministes de définir si les différents bureaux ont été occupés ou non de manière à se rapprocher de la réalité.

Le « Occupancy Simulator[37] » (simulateur d'occupation) est une plateforme Web développée par le laboratoire Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) afin de générer et de simuler le mouvement et la présence des occupants en se basant sur un modèle stochastique de chaines de Markov. Le simulateur d'occupation génère les probabilités de mouvement en se basant sur les profiles des occupants. Il permet une simulation dans les bâtiments résidentiels et les bâtiments de bureaux.

Pour générer les scénarios d'occupation à travers cet outil, il faut fournir un ensemble de données sur l'occupation du bâtiment. Les données obtenues à partir du questionnaire (Annexe 1), nous ont permis de compléter l'ensemble des données d'entrée suivantes du simulateur d'occupation en plus d'autres données contextuelles :

- Nombre de bureaux.
- Surface des bureaux.
- Position des occupants.
- Heure d'arrivée.
- Heure de départ.
- Nombre d'heures de travail.
- Nombre d'heures de pause.
- Nombre d'occupants par bureau.
- Jours fériés.
- Nombre de jours de congés par occupant.

[37] http://behavior.lbl.gov/?q=node/6

5.1.3.2 *Scénarios de chauffage et de climatisation*

Afin de déterminer les différents niveaux de comportement liés au chauffage et à la climatisation, nous nous basons sur le **Tableau 27** des écogestes et les réponses aux deux questions suivantes issues du questionnaire :

- *Utilisation du boitier d'ambiance dans le bâtiment*

D'après le questionnaire, 8 % des répondants ne savent pas utiliser le boitier de chauffage dans leurs bureaux et évitent donc de l'utiliser. 48 % savent seulement augmenter et diminuer la consigne de chauffage et de climatisation. Pour 20 % des occupants, la décision de changer la consigne de température est prise par le gestionnaire du bâtiment. On peut donc conclure que pour un premier niveau « Niveau 0 » de comportements qualifié de plus énergivore, les consignes de chauffage et de climatisation demeurent inchangées et assurent un maximum de confort pour les occupants. D'ailleurs, la raison essentielle derrière l'ajustement des températures dans les bureaux est la recherche du confort (60 %). Nous considérons donc un intervalle de consignes entre 19 °C et 23 °C pour les différents niveaux étudiés. Face à une situation d'inconfort, 60 % des réponses attestent que l'occupant augmente la consigne de chauffage, les autres changent leur façon de se vêtir.

- *Fenêtres et systèmes d'occultation*

10 % seulement des occupants affirment éteindre le système de chauffage ou de climatisation quand les fenêtres sont ouvertes.

5 % des occupants affirment fermer les systèmes d'occultation en quittant le bureau pendant la période de chauffage. Pour la saison de climatisation, 52 % affirment que les fenêtres sont fermées tout le temps, 26 % ouvrent les fenêtres le matin pour faire entrer de l'air frais. 75 % des occupants affirment laisser les fenêtres fermées le soir en quittant le bureau.

Les consignes de chauffage choisies par les occupants dans le bâtiment varient entre 20 °C et 24,5 °C ; celles de la climatisation varient entre 23 °C et 25 °C

En se basant sur toutes ces données, nous définissons les actions suivantes liées aux scénarios de chauffage et de climatisation pour les différents niveaux :

- *Niveau 0*
  - Une consigne de 23 °C pour le chauffage tout le temps.
  - Une consigne de 23 °C pour la climatisation tout le temps.
  - Les occupants augmentent la consigne de chauffage en cas d'inconfort. Cela se traduit par la situation suivante :

    Si PMV[38] > ± 0,5, alors les occupants augmentent la consigne de chauffage à 24,5°C

  - Les occupants diminuent la consigne de climatisation en cas d'inconfort. Cela se traduit par la situation suivante :

    Si PMV > ± 0,5, alors les occupants diminuent la consigne de climatisation à 22°C

[38] L'indice PMV (Predicted Mean Vote), décrit par la norme ISO 7730, prédit la valeur moyenne des votes d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique à 7 points allant de très chaud à très froid

- Les occupants ne ferment pas les systèmes d'occultation en quittant le bureau en hiver et donc ne participent pas à préserver la chaleur intérieure du bureau.
- *Niveau 1*
- Une consigne de température plus basse pour le chauffage (22 °C) et plus élevée pour la climatisation (24 °C) pour plus d'économies d'énergie.
- Le chauffage ou la climatisation sont éteints dès que l'occupant quitte son bureau.
- Dans ce cas aussi, les occupants privilégient leur confort, donc :
- Si PMV > ± 0,5, alors les occupants augmentent la consigne de chauffage à 23 °C et diminuent celle de la climatisation à 23 °C.
- Une probabilité de 0,4 que les systèmes d'occultations soient fermés en quittant le bureau pendant la saison de chauffage

- *Niveau 2*
- Une consigne de température plus basse pour le chauffage (21 °C) et plus élevée pour la climatisation (24 °C) pour plus d'économies d'énergie.
- Le chauffage ou la climatisation sont éteints dès que l'occupant quitte son bureau.
- Dans ce cas, une probabilité de 0,6 que l'occupant se vêtisse d'un pull et n'augmente pas la consigne de chauffage en cas de sensation de froid
- Une probabilité de 0,6 que les systèmes d'occultation soient fermés en quittant le bureau pendant la saison de chauffage.
- Refroidissement naturel en été en ouvrant les fenêtres le matin tant que Text < Tint.
- Le système de refroidissement est allumé l'après-midi.

- *Niveau 3*
- Une consigne de température plus basse pour le chauffage (19°C ou 20°C) et plus élevée pour la climatisation (25 °C) pour plus d'économies d'énergie.
- Le chauffage et la climatisation sont éteints une heure avant de quitter le bureau par les occupants.
- Les occupants éteignent le chauffage et la climatisation quand les fenêtres sont ouvertes.
- Les occupants se vêtissent d'un pull et n'augmentent pas la consigne de chauffage en cas de sensation de froid.
- Une probabilité de 0,9 que les systèmes d'occultation soient fermés en quittant le bureau pendant la saison de chauffage.
- Refroidissement naturel en été en ouvrant les fenêtres le matin tant que $T_{ext} < T_{int}$.
- Le système de refroidissement est allumé l'après-midi.
- Fenêtres ouvertes la nuit pour le rafraîchissement nocturne. Cette hypothèse n'est pas généralisable à tous les bâtiments pour des raisons de sécurité.

Nous résumons dans les tableaux (**Tableau 29**) et (**Tableau 30**) ci-dessous les différents comportements relatifs à chaque niveau pour les scénarios de chauffage et de climatisation :

	Niveau 0	*Niveau 1*	*Niveau 2*	*Niveau 3*
Consigne de température (°C)	23	22	21	19 ou 20
Fonctionnement	Système de chauffage tout le temps allumé	Éteint après le départ de l'occupant	Éteint après le départ de l'occupant	Éteint une heure avant le départ de l'occupant
Réaction en cas d'inconfort	Rajouter 1,5°C dans la consigne de chauffage	Rajouter 1°C dans la consigne de chauffage	Probabilité de 0,6 de rajouter 1°C dans la consigne de	Mettre un pull ce qui évite toute augmentation de la température

			chauffage	de consigne
Fenêtres ouvertes	Le système de chauffage n'est pas éteint	Le système de chauffage n'est pas éteint	Le système de chauffage n'est pas éteint	Le système de chauffage est éteint tant que les fenêtres sont ouvertes
Systèmeq d'occultation saison de chauffage	Complètement ouvertes après le départ de l'occupant	Probabilité de 0,4 de fermeture après départ de l'occupant	Probabilité de 0,6 de fermeture après le départ de l'occupant	Système d'occultation complètement fermés après le départ de l'occupant

Tableau 29 : Niveaux de comportement liés à l'utilisation du chauffage

	Niveau 0	*Niveau 1*	*Niveau 2*	*Niveau 3*
Consigne de température (°C)	23	24	24	25
Fonctionnement	Système de climatisation tout le temps allumé	Éteint après le départ de l'occupant	Système de climatisation allumé l'après-midi seulement et éteint après le départ de l'occupant	Système de climatisation allumé l'après-midi seulement et éteint une heure avant le départ de l'occupant
Ouverture des fenêtres en période de climatisation	Fermées tout le temps	Fermées tout le temps	Ouvertes le matin si $T_{ext} < T_{int}$; sinon fermées et système de climatisation allumé + fenêtres fermées après le départ de l'occupant	Ouvertes le matin si $T_{ext} < T_{int}$; sinon fermées et système de climatisation allumé + fenêtres ouvertes après le départ de l'occupant
Fenêtres ouvertes	Le système de climatisation n'est pas éteint	Le système de climatisation n'est pas éteint	Le système de climatisation n'est pas éteint	Le système de climatisation est éteint tant que les fenêtres sont ouvertes

Tableau 30 : Niveaux de comportements liés à l'usage de la climatisation

5.1.3.3 *Scénarios d'éclairage*

En ce qui concerne l'usage des équipements d'éclairage, nous distinguons les comportements suivants sur la base desquels nous définissons les différents niveaux de comportements que nous résumons dans le (**Tableau 31**) :

- Occupants qui contrôlent l'éclairage suivant la luminosité de la pièce (76 % des réponses). Nous distinguons le cas où l'occupant allume l'éclairage dès qu'il a besoin de luminosité et oublie de l'éteindre après et le cas où l'occupant allume et éteint l'éclairage en fonction de la luminosité de la pièce (43 %). Dans ce cas aussi, nous distinguons de seuils de besoins de luminosité : 300 lux et 500 lux qui définissent deux niveaux différents de comportements.
- 22 % des occupants laissent les lumières allumées tout le temps au cours de la journée dans leurs bureaux même dans les cas où les besoins de luminosité sont assurés naturellement. Nous distinguons aussi le cas où les occupants éteignent les lumières à chaque fois qu'ils quittent le bureau (52 %)
- Certains occupants éteignent les lumières de leur bureau après leur départ, d'autres oublient de le faire (2 %). Dans ce cas, nous notons que la présence d'une équipe de sécurité dans le bâtiment assure que les lumières sont éteintes à 20 h dans tous les bureaux.
- En ce qui concerne les systèmes d'occultation, 11 % des réponses affirment qu'ils sont maintenus ouverts le matin afin de profiter de la lumière naturelle.

	Niveau 0	*Niveau 1*	*Niveau 2*	*Niveau 3*
Fonctionnement en cas d'occupation	Tout le temps allumé	Allumé en cas de besoin et n'est pas éteint après	Allumé et éteint en fonction de la luminosité de la pièce. Éteint si la luminosité de la pièce est ≥ 500 lux	Allumé et éteint en fonction de la luminosité de la pièce. Éteint si la luminosité de la pièce est ≥ 300 lux
Fonctionnement en cas de non-occupation	Tout le temps allumé	Éteint seulement quand l'occupant quitte le bureau le soir	Éteint seulement quand l'occupant quitte le bureau le soir	Éteint à chaque fois l'occupant quitte le bureau
Systèmes d'occultation	Probabilité de 0,8 qu'ils soient partiellement fermés le matin (50 % de fermeture)	Probabilité de 0,5 qu'ils soient partiellement fermés le matin (50 % de fermeture)	Probabilité de 0,2 qu'elles soient partiellement fermées le matin (50 % de fermeture)	Complètement ouverts le matin

Tableau 31 : Niveaux de comportement liés à l'usage des équipements d'éclairage

5.1.3.4 *Scénarios puissances dissipées*

D'après les réponses des occupants aux questions liées à l'usage des appareils électriques dans le bâtiment, dans la *Partie II : Le bâtiment et vous – Équipements électriques* du questionnaire (Annexe 1) (*Exemple : Si vous travaillez sur un ordinateur portable lié à un ou des écrans, en quittant le bureau : Vous éteignez les écrans et les débranchez ?; Vous éteignez les écrans sans les débrancher ?; Vous avez une multiprise que vous éteignez ; Vous ne faites rien*), nous avons pu recenser les comportements d'usage des équipements électriques et leur pourcentage d'application par les occupants

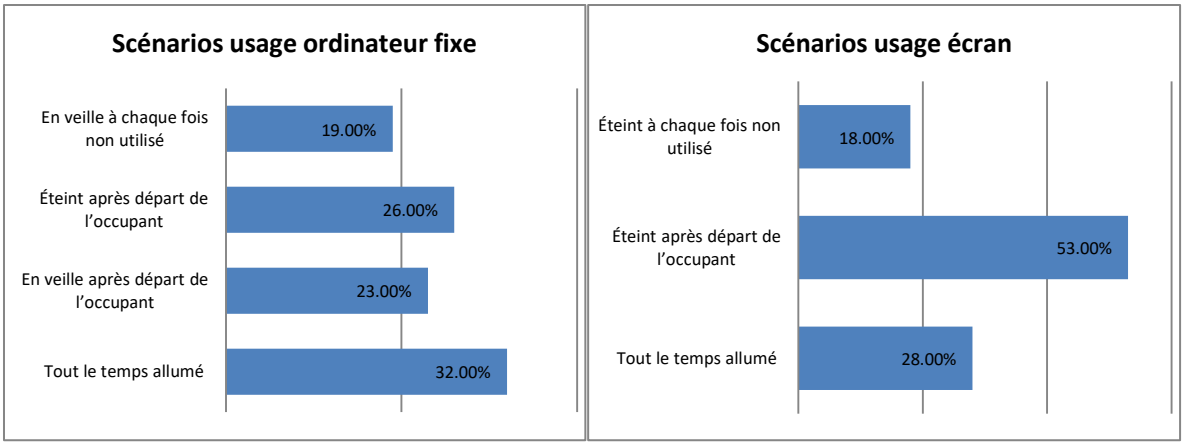


Figure 48 : Pourcentage d'adoption de certains comportements d'après les données du questionnaire

	Niveau 0	*Niveau 1*	*Niveau 2*	*Niveau 3*
Ordinateur portable	Branché tout le temps	Débranché après départ de l'occupant	Branché en cas de besoin	Branché en cas de besoin
Ordinateur fixe	Tout le temps allumé même en cas d'absence et de vacances	En veille après départ de l'occupant	Éteint après départ de l'occupant	En veille à chaque fois que non utilisé
Écran	Tout le temps allumé même en cas d'absence et de vacances	Éteint après départ de l'occupant	Éteint après départ de l'occupant	Éteint à chaque fois que non utilisé
Bouilloire	Tout le temps branchée	Tout le temps branchée	Débranchée en cas de non-utilisation	Débranchée en cas de non-utilisation + Utilisation de la quantité d'eau nécessaire seulement
Machine à café	Tout le temps branchée	Tout le temps branchée	Débranchée en cas de non-utilisation	Débranchée en cas de non-utilisation

Tableau 32 : Niveaux de comportement d'usage des équipements dans les bureaux

Chaque cas d'utilisation : éteint, en veille, débranché, correspond à une puissance d'usage qui permet de définir la puissance totale des équipements électriques utilisés dans le bureau au pas horaire.

5.1.4 *Génération des scénarios*

Pour les différentes situations citées précédemment, nous avons développé un algorithme qui permet de générer les différents scénarios suivant les lois présentées précédemment. Certains scénarios nécessitent des données d'entrée météo mais aussi des données générées par des

simulations préalables (comme les températures intérieures par exemple). Une phase de prétraitement est donc nécessaire.

Nous distinguons 6 scénarios d'entrée pour chaque bureau : occupation, températures extérieures, températures intérieures, PMV, éclairement naturel et ouvertures de fenêtre. Chaque fichier est représenté par une colonne de valeurs de telle sorte que chaque ligne représente une heure d'une journée de toute l'année. Le fichier contient donc : 24 x 365 = 8 760 lignes. Une fois importé dans Pleiades+Comfie, le logiciel affecte les valeurs horaires de chaque scénario au jour qui convient.

Ceci va permettre d'effectuer des simulations thermiques dynamiques avec les scénarios générés afin de quantifier l'impact des différents comportements et niveaux de comportements sur les réductions des consommations énergétiques du bâtiment dans le cas où une politique de changement de comportements orientée occupants était mise en place (**Figure 49**).

Le (Tableau 33) ci-dessous résume les données d'entrée et de sortie de l'algorithme qui représentent les scénarios d'entrée de la simulation thermique dynamique

Données d'entrée	Sources des données	Scénarios générés
Occupation	Scénario stochastique généré par l'Occupancy Simulator	- Tous les scénarios
Températures extérieures	Fichier météo	- Consignes de chauffage - Consignes de climatisation - Ouvertures des fenêtres
Températures intérieures	Simulations en prétraitement	
PMV	Simulations en prétraitement	- Consignes de chauffage - Consignes de climatisation
Éclairement naturel	Simulations en prétraitement	- Éclairage
Ouvertures des fenêtres	Données GTB	- Consignes de chauffage - Consignes de climatisation - Ouvertures des fenêtres

Tableau 33 : Données d'entrée et de sortie de l'algorithme pour la génération des niveaux de comportement

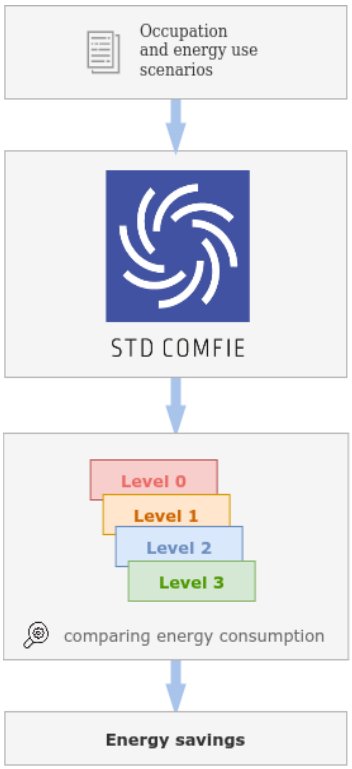


Figure 49 : Schéma récapitulatif de la démarche adoptée pour l'étude de l'impact des différents niveaux de comportement sur les consommations d'énergie dans le bâtiment

5.1.5 *Étude de l'impact du changement de comportement*

Nous disposons dans le bâtiment de 56 bureaux. Grâce à l'interface, nous affectons de façon aléatoire les quatre niveaux aux différents bureaux suivant les cas ci-dessous (**Tableau 34**).

	Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Cas 1	100 %	0 %	0 %	0 %
Cas 2	0 %	100 %	0 %	0 %
Cas 3	0 %	0 %	100 %	0 %
Cas 4	0 %	0 %	0 %	100 %
Cas 5	25 %	25 %	25 %	25 %
Cas 6	50 %	10 %	10 %	30 %
Cas 7	30 %	10 %	10 %	50 %
Cas 8	10 %	40 %	40 %	10 %
Cas 9	40 %	10 %	10 %	40 %

Tableau 34 : Différents cas de répartition des niveaux de comportement dans le bâtiment afin d'évaluer leur impact

Les résultats obtenus montrent qu'une implication totale des occupants en adoptant le niveau 3 de comportements conduit à une différence de 74 % de consommations d'énergie annuelles du chauffage comparée au cas le plus consommateur, autrement dit quand le niveau 0 est adopté à 100 %. Pour la climatisation, cette valeur est de 40 %, et de 83 % pour l'éclairage. Elle atteint 50 % pour le cas de l'utilisation des équipements électriques.

La considération de plusieurs niveaux de comportement permet de déterminer les facteurs les plus influents et auxquels il faut accorder le plus d'importance dans le cadre d'une politique de réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment à travers ses occupants.

L'analyse des résultats de simulation de plusieurs combinaisons de niveaux de comportement dans le bâtiment en termes de réductions de consommation d'énergie nous permet de constater les éléments suivants :

- L'impact des consommations inutiles enregistrées aux heures de non-occupation du bâtiment. Il s'agit d'un point soulevé par plusieurs travaux (Sun and Hong, 2017; Martinaitis et al., 2015 ; Panchabikesan et al., 2021), et que nous venons conforter dans le cas de notre étude. Pour les différents systèmes, le Niveau 0 implique un usage en dehors des horaires d'occupation. Nous remarquons dans le cas du chauffage une différence de 35 % entre le Niveau 0 et le Niveau 1, ce qui démontre l'impact de ce volet. Cet impact est cependant de 4 % seulement dans le cas du système d'éclairage vu la présence du staff de sécurité du bâtiment qui se charge d'éteindre les lumières dans la totalité des bureaux. Ceci nous donne une idée sur les solutions à adopter dans le bâtiment, notamment l'utilisation de solutions technologiques permettant d'éteindre les équipements en cas d'absence des occupants, mais il est aussi intéressant d'éduquer les occupants afin qu'ils appliquent des gestes simples en quittant le bureau afin de garantir moins de consommations même dans le cas où des solutions technologiques ne sont pas mises en place ou sont en arrêt.
- Les réductions d'énergie les plus importantes (60 %) se font entre le niveau 2 et le niveau 3 dans le cas du chauffage. Cela est lié à la baisse de la consigne de chauffage et la réduction de la probabilité d'augmenter la consigne de chauffage en cas d'inconfort. La solution à adopter dans ce cas est de fixer une température minimale dans les bureaux et donner la liberté aux occupants de l'augmenter en cas de besoin tout en les sensibilisant à l'importance de garder la consigne minimale (Figure 50).

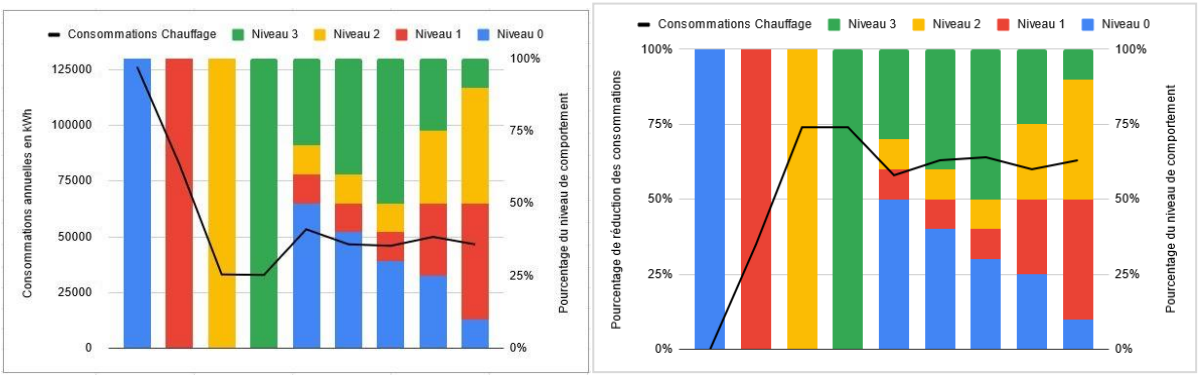


Figure 50 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour le système de chauffage

- Les réductions de consommations les plus importantes (77 %) sont obtenues entre le niveau 1 et le niveau 2 pour le système d'éclairage. Ceci est lié à une utilisation maximale de la lumière naturelle et le recours à l'éclairage artificiel en cas de besoin seulement. L'extinction des lumières à chaque fois que l'occupant quitte le bureau durant les horaires de travail a un impact mais qui reste minimale devant le recours à l'éclairage naturel (Figure 51).

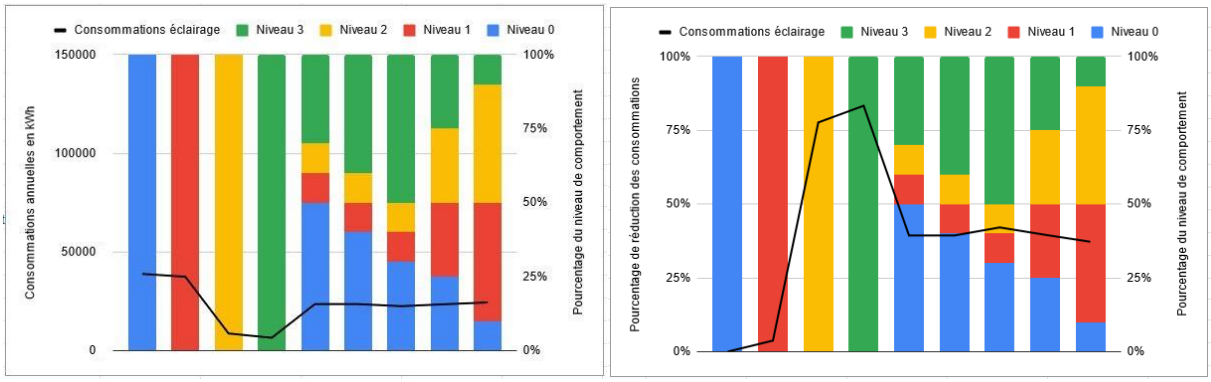


Figure 51 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour le système d'éclairage

- Éteindre les équipements durant les horaires d'absence des occupants représente l'écogeste ayant le plus d'impact sur la réduction des consommations électriques. Les réductions des consommations entre le niveau 1 et le niveau 2 est de 48 %. La mise en veille des appareils électriques ou le fait de les éteindre en cas de non-utilisation pendant la journée conduisent aussi à un gain d'énergie mais qui reste plus faible qui ne dépasse pas 5 % (Figure 52).
- Dans le cas du système de climatisation, le rafraichissement nocturne et le recours à l'ouverture des fenêtres quand cela est possible durant la journée, permet des réductions importantes d'énergie représentées par le passage du niveau 2 et le niveau 3 et qui sont équivalentes à 33 %. Vu que les températures la nuit sont plus faibles, les pertes d'énergie dues à un système de climatisation non éteint la nuit ne sont pas aussi importantes que celles dans le cas du système de chauffage, c'est pourquoi éteindre le système de climatisation durant les horaires d'inoccupation ne dépassent pas 2 % (Figure 53).

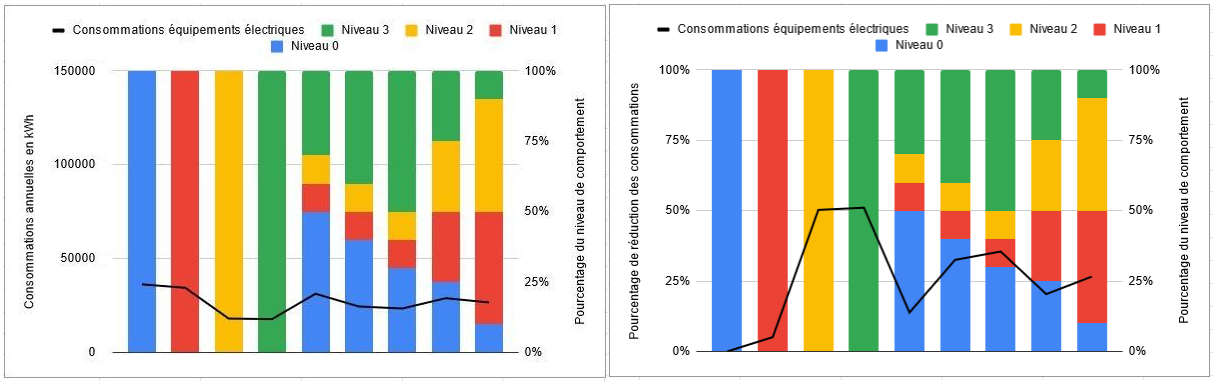


Figure 52 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour les équipements électriques

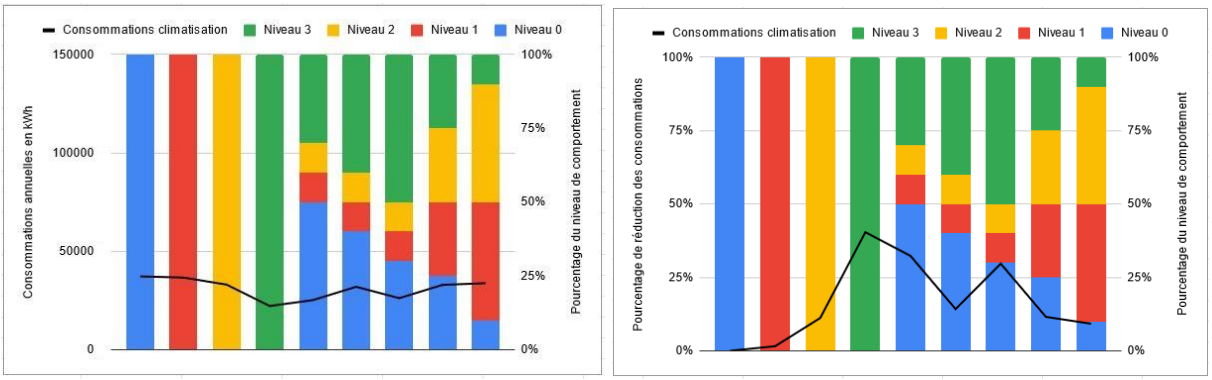


Figure 53 : Consommations d'énergie des différents niveaux de comportements et les réductions de consommations associées pour les systèmes de climatisation

En ce qui concerne le pourcentage d'adoption des niveaux de comportement dans le bâtiment, les réductions obtenues grâce à une implication totale dans le niveau 3 d'écogestes peuvent atteindre 80 %, et 70 % dans le cas du niveau 2 d'écogestes. Une implication qui dépasse 40 % par les occupants du bâtiment dans les écogestes de niveau 3 permet des économies d'énergie allant jusqu'à 64 %. Les réductions sont minimales dans le cas d'une totale adoption du niveau 0 ou du niveau 1 ou dans le cas où cette dernière dépasse 50 %. Il est donc important de sensibiliser les occupants pour qu'ils soient nombreux à éviter les comportements énergivores comme ceux liés au niveau 0 et harmoniser le niveau de comportement des occupants avec un niveau 1 ou 2 (**Figure 55**).

Il serait aussi intéressant de positionner les consommations réelles du bâtiment face à une échelle des niveaux de comportement afin de savoir dans quel sens améliorer la sensibilisation des occupants et le pourcentage d'occupants à impliquer dans l'avenir (**Figure 54**)

Nous constatons que dans le cas du bâtiment sujet de l'étude, les consommations du bâtiment se situent au niveau 1 de comportements. Cette façon de voir le niveau des écogestes dans le bâtiment permet, dans le cadre d'une démarche de réduction des consommations d'énergie à travers l'occupant, de cibler les objectifs à atteindre. D'après la **Figure 54**, les consommations du bâtiment correspondent à des consommations où presque la totalité des occupants sont de niveau 1. C'est-à-dire que la plupart des occupants utilisent une consigne de chauffage de 22 °C qu'ils augmentent en cas d'inconfort. Pour l'éclairage, ils auront tendance à allumer quand il le faut mais à ne plus éteindre ensuite, même en quittant le bureau pendant des moments de la journée. Le soir ils éteignent en partant. Ils mettent en veille l'ordinateur en quittant le bureau et éteignent les écrans. Pour réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment, il faut donc amener les occupants à améliorer ces comportements en adoptant des écogestes du niveau 2, par exemple : inciter les occupants à réduire d'un degré la consigne de température de chauffage et favoriser le port de vêtements chauds pour assurer le confort thermique. Pour l'éclairage, les écogestes à encourager sont liés à la favorisation de l'éclairage naturel. Les occupants doivent être encouragés à éteindre la lumière à chaque fois que la lumière extérieure est suffisante. Cela peut bien entendu être obtenu à travers l'utilisation de systèmes intelligents d'éclairage qui s'adaptent à la lumière naturelle et aux besoins de l'occupant (Shankar et al., 2020) mais en l'absence de ce genre de systèmes, le changement de comportement des occupants peut mener aux réductions d'énergie correspondantes. Le passage de 40 % des occupants au niveau 2 de comportement et de 10 % au niveau 3 peut mener théoriquement à 13 % de réductions par rapport aux consommations actuelles.

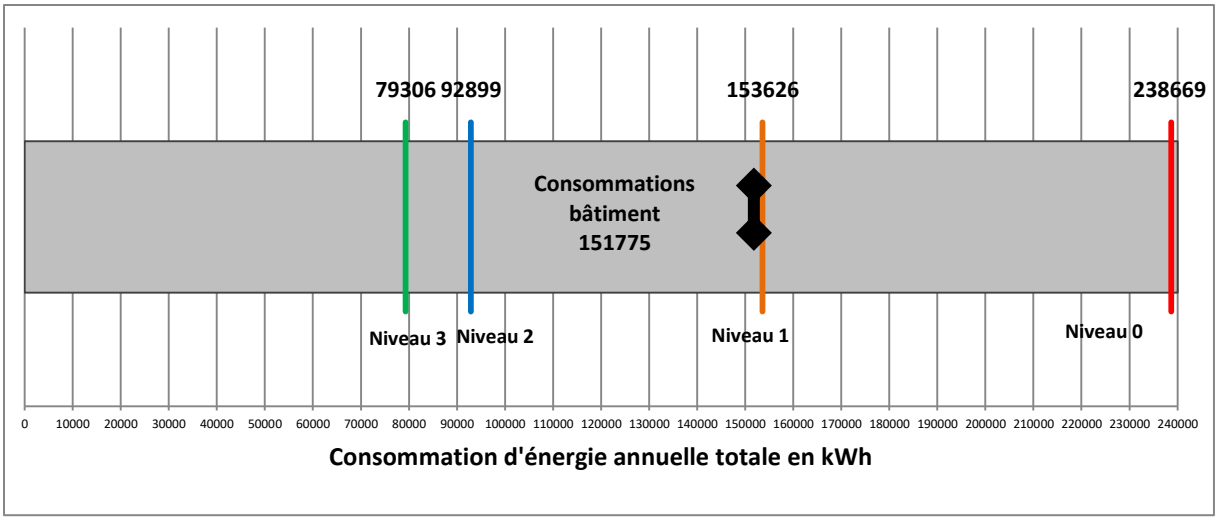


Figure 54: Positionnement des consommations annuelles totales du bâtiment par rapport aux niveaux de comportement

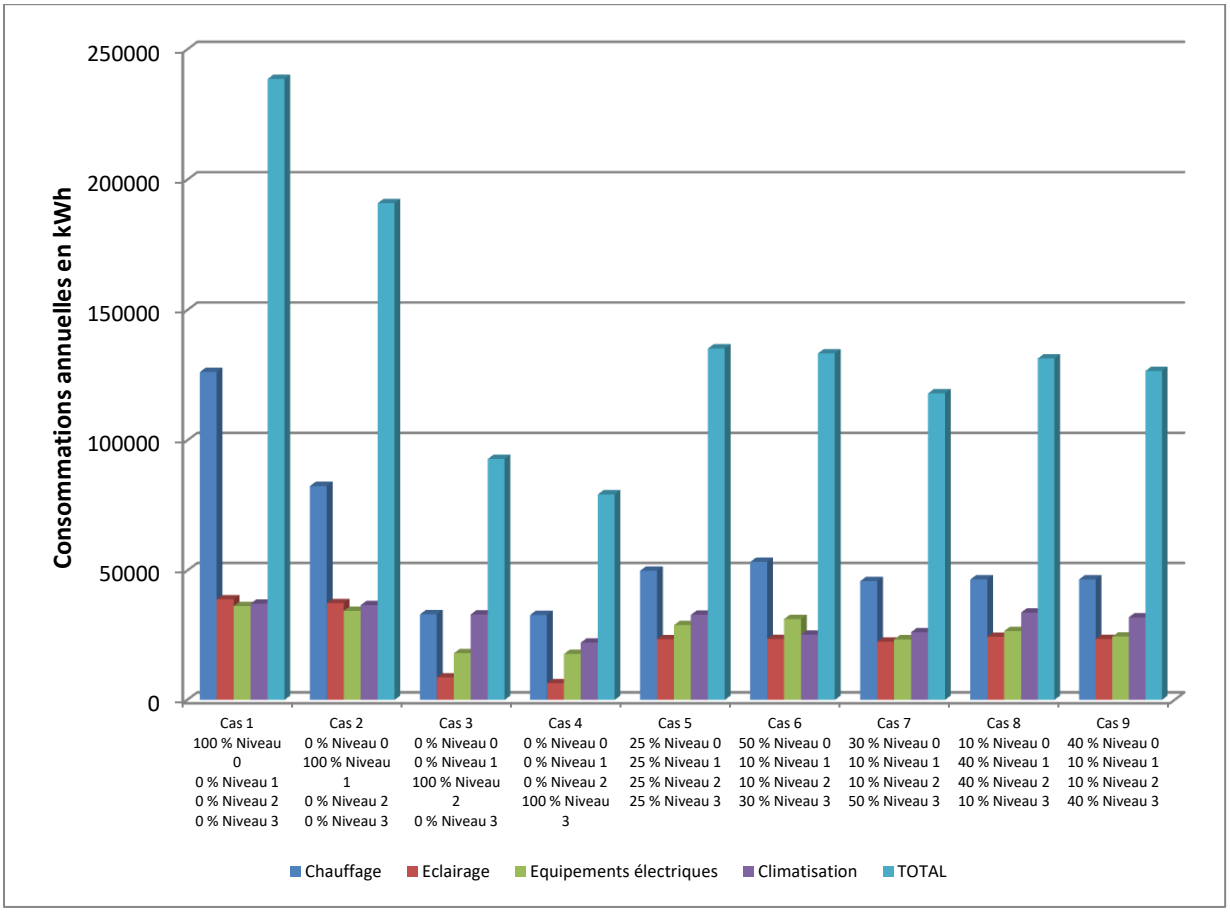


Figure 55: Consommations d'énergie annuelles relatives aux différents niveaux de comportement

Ces différences de consommation d'énergie entre les différents niveaux de comportement permettent d'estimer les gains d'énergie dus à l'adoption de la totalité des écogestes des différents systèmes dans le bâtiment étudié (**Figure 56**). Cette analyse du potentiel de réduction des consommations d'énergie permet de définir un niveau maximum de réduction des consommations d'énergie lié à une adoption totale des écogestes de chaque système par l'ensemble des occupants.

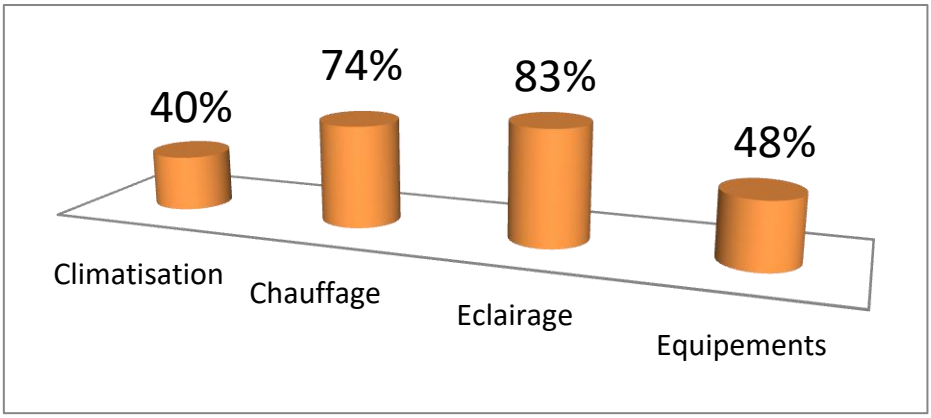


Figure 56: Potentiel de réduction des consommations d'énergie par système

Comparées aux solutions technologiques, aux travaux de rénovation ainsi qu'aux autres améliorations possibles dans le bâtiment, les mesures de changement de comportements représentent des solutions peu coûteuses qui peuvent s'appliquer sur une longue période de temps et accompagner l'effort global de réduction de consommation dans le bâtiment. Comme nous l'avons montré dans la partie 3.3 du chapitre II, la plupart des travaux ont essayé de quantifier les gains en énergie possibles dans les bâtiments de bureaux à travers des écogestes. Ces travaux n'ont pas tenu compte de la globalité des systèmes notamment les systèmes d'occultation et l'ouverture des fenêtres en parallèle des autres systèmes (Sun and Hong, 2017). Ces différents travaux ont aussi souligné dans les limitations de leur approche la nécessité de proposer des solutions qui visent l'occupant et peuvent mener à des changements de comportement afin de garantir les gains d'énergie estimés (He et al., 2021).

La prochaine et dernière partie de ce travail a pour objectif de présenter le développement de la solution que nous avons créée afin de changer le comportement des occupants du même bâtiment étudié. L'impact de ce changement de comportement et de l'évolution des occupants par rapport aux différents niveaux proposés est aussi présenté.

6 *Discussion et conclusion du chapitre*

Ce chapitre représente une première partie de notre approche pluridisciplinaire visant à mieux représenter le comportement des occupants en se basant sur plusieurs sources de données et à évaluer l'impact de l'application des écogestes dans le même bâtiment. Ce chapitre présente un premier jet de résultats liés à l'utilisation de Pleiades – Comfie, logiciel de simulation thermique dynamique afin d'estimer les gains d'énergie possibles suite à un changement de comportement de la part des occupants.

Cette première partie de résultats s'inscrit dans une approche pluridisciplinaire basée sur les quatre piliers suivants :

- La simulation thermique dynamique comme outil pour quantifier les consommations énergétiques dans le bâtiment
- Les capteurs comme outil de mesure des consommations énergétiques réelles dans le bâtiment
- Le questionnaire, à la fois comme outil pour comprendre le comportement des occupants dans le bâtiment ; mais aussi comme moyen pour extraire des profils des occupants

- Les nudges, comme solution proposée dans le cadre des travaux de cette thèse afin de changer le comportement et dont l'impact est évalué.

Nous discuterons un à un chacun de ces piliers, les résultats obtenus le concernant, ses limitations et les améliorations possibles. Dans ce chapitre, les résultats ont surtout été basés sur la simulation thermique dynamique, les capteurs et le questionnaire. Le chapitre qui va suivre et qui représente essentiellement une étude expérimentale comportementale est basé sur les consommations réelles du bâtiment, le questionnaire et les nudges.

La simulation thermique dynamique a été effectuée à travers le logiciel Pleiades-Comfie, le plus couramment utilisé en France pour les simulations thermiques dynamiques. Comme nous l'avons évoqué auparavant, ce logiciel présente des avantages de part son interface facile d'utilisation, mais aussi la qualité des résultats qu'il fournit. Cependant, ce logiciel ne permet un accès direct à son cœur de programmation, ce qui représente une limitation par rapport à la possibilité d'y intégrer un modèle de comportement. Son module AMAPOLA par ailleurs tient compte du volet occupant et comportement des occupants. Le logiciel Energy Plus est le plus utilisé dans la littérature pour évaluer l'impact du comportement des occupants sur les consommations d'énergie et pour intégrer des modèles de comportement. Compte tenu de ce constat, et vu que nous travaillons dans un contexte français, notre choix s'est porté sur le logiciel Pleiades-Comfie comme première étude dans ce contexte en utilisant ce logiciel.
La simulation thermique dynamique a montré que les résultats sont plus proches des consommations réelles quand nous nous basons sur des données issues du questionnaire ou des capteurs de consommations. Nous nous sommes basés pour cela sur les données collectées pour créer des modèles déterministes mais aussi utiliser le modèle d'AMAPOLA en lui fournissant les informations nécessaires. Cette première étude aurait pu été plus générale si une intégration par co-simulation des comportements quotidiens des occupants à travers des modèles stochastiques intégrés dans le logiciel Pleiades-Comfie. Cependant cela n'a pas été possible au vu du manque de flexibilité du logiciel, mais aussi cela n'aurait pas été pertinent au vu du petit échantillon étudié.

Nous avons intégré par ailleurs le volet stochastique lors de l'étude de l'impact des comportements des occupants sur la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment. Le modèle d'occupation utilisé est un modèle stochastique et les plannings représentatifs des actions des occupants sont alignés sur ce modèle d'occupation. La génération de ces scénarios a été possible grâce à un outil que nous avons développé et qui permet de : définir les zones du bâtiment, créer des règles de génération de scénarios à partir de données d'entrée, et finalement générer pour chaque zone les scénarios correspondants sous différents formats pour les intégrer dans le logiciel de simulation. Le développement de cet outil nous a permis de générer autant de scénarios nécessaires mais a aussi été développé avec un souci de généralisation pour de futures recherches. Les résultats obtenus ont montré la nécessité de cibler les écogestes avec le plus d'impact sur la réduction des consommations énergétiques afin de garantir le plus de réductions d'énergie. En effet, ce type d'écogestes même avec une faible implication des occupants permet d'obtenir des réductions de consommations d'énergie équivalentes à celles avec une implication totale des occupants dans des écogestes avec moins d'impact. Les écogestes liés au chauffage sont ceux avec le plus d'impact en particulier le bon choix de la consigne de température et l'arrêt du chauffage avant le départ des occupants. Ceci peut être obtenu de façon programmable, mais est à considérer dans le cas où des systèmes de gestion de chauffage ne

sont pas disponibles ou ne fonctionnent pas. C'est pourquoi il est important de compléter cette étude en proposant un moyen qui permet de changer le comportement des occupants afin d'éviter tout effet rebond lié à un sentiment d'inconfort, ou sans avoir à imposer une consigne de température par exemple. Une autre partie de cette étude par simulation thermique dynamique a concerné la proposition de 4 niveaux de comportements (Chapitre III, partie 5.1.3 ; page 117) suivant l'occurrence des écogestes dans le bâtiment. Nous avons estimé l'impact de chaque niveau sur la réduction des consommations d'énergie. Un grand potentiel de réduction des consommations d'énergie est possible dans le cas où une adoption totale de ces écogestes est entreprise par les occupants.

L'utilisation des capteurs a intervenu sur deux niveaux. D'abord, cela a permis de collecter les données de consommations afin de générer des scénarios se rapprochant de la réalité. Dans un deuxième temps, les capteurs ont été utilisés afin d'assurer un suivi des consommations des occupants. Les résultats correspondants sont présentés dans le Chapitre IV. Le choix de l'utilisation de capteurs connectés a permis de présenter une approche de suivi de consommations des occupants avec des capteurs à faible coût et de présenter aussi une logique de génération de scénarios à partir des données de capteurs.

Un autre pilier de notre étude est le questionnaire qui a été créé avec un double objectif. D'abord, collecter des données pour générer les scénarios utilisés pour la simulation thermique dynamique à partir de questions sur les activités quotidiennes des occupants. Ensuite, pour une étude comportementale qui fera l'objet du chapitre suivant (Chapitre IV).

Si nous avons présenté dans ce chapitre l'impact de l'adoption des écogestes par simulation thermique dynamique, nous souhaitons l'estimer concrètement dans le cadre d'une expérimentation qui implique les occupants tout en proposant un moyen de changement de comportement. Cette étude fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV : Étude expérimentale : nudges et simulation thermique dynamique

Après avoir quantifié par simulation thermique dynamique les réductions d'énergie possibles suites à l'adoption d'écogestes par les occupants, nous avons effectué une étude expérimentale afin d'investiguer les moyens de changements de comportement capables d'inciter le maximum d'adoption d'écogestes possible. Nous évaluons aussi l'impact des nudges comme incitations à la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment de bureaux à travers une étude préalable sur les profils des occupants. Nous résumons ci-dessous les objectifs de ce travail expérimental :

- Identifier les comportements consommateurs d'énergie et la façon de les changer.
- Comprendre les profils des occupants consommateurs d'énergie dans le bâtiment.
- Investiguer les possibilités de réduction de consommations d'énergie dans le bâtiment en utilisant les nudges.
- Investiguer quelles nudges ou combinaisons de nudges sont les plus efficaces.
- Investiguer l'efficacité des canaux de communication.
- Étudier la durabilité dans le temps des nudges.

1 *Questionnaire et création des profils de consommateurs*

1.1 *Hypothèses*

En se basant sur l'étude théorique préalablement établie (Chapitre II-Partie 5), nous avons pu faire ressortir certains facteurs qui influent sur le comportement vis-à-vis de l'usage de l'énergie au sein du bâtiment. Ces facteurs représenteront la base de notre étude et le questionnaire aura pour but de les quantifier afin de déterminer leur lien avec l'adoption d'un comportement plus vertueux dans leur usage de l'énergie. Nous nous baserons essentiellement sur les théories suivantes : Théorie du comportement planifié et théorie de l'action raisonnée, théorie des valeurs, croyances, normes et théorie du comportement interpersonnel. Dans ce qui suit nous présentons les hypothèses sur lesquelles se basent notre travail impliquant les facteurs choisis :

H1 : L'adoption du comportement recherché est liée à la création d'une **intention** chez les occupants, elle-même dictée par plusieurs facteurs sujets des hypothèses qui suivront (Ertz et al., 2016).

H2 : Il existe un lien positif entre **la perception de contrôle du comportement** et l'intention de réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment. Ainsi, plus l'occupant se sent capable d'adopter le comportement souhaité plus son intention de le faire augmente (de Leeuw et al., 2015).

H2.1 : La perception de contrôle du comportement augmente avec l'augmentation des **connaissances de l'usage des équipements consommateurs d'énergie** dans le bâtiment et **la connaissance des écogestes** qui peuvent réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment (P. Liu et al., 2020).

H2.2 : Plus l'individu perçoit qu'il existe des **facteurs facilitant** son adoption du comportement, plus sa perception de contrôle du comportement augmente.

H3 : L'intention de réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment est positivement liée à la **norme subjective** ou **norme sociale** (Farrow et al., 2017).

H4 : L'intention de réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment est dictée par une **attitude positive** envers ce genre de comportements (Patel et al., 2017).

H4.1 : L'attitude positive envers les comportements de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment est positivement liée à la **conscience énergétique** de l'individu. Plus l'individu est conscient de la nécessité de réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment, plus il juge positivement les comportements visant la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.

H4.2 : La préoccupation financière pourrait impacter positivement l'attitude de l'individu envers les comportements de réduction de consommations énergétiques dans le bâtiment. Plus l'occupant est soucieux de l'impact financier des comportements plus il juge positivement les écogestes.

H4.3 : Les personnes soucieuses de leur **confort** ont tendance à avoir une attitude négative envers les comportements de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment. Le confort perçu est donc négativement lié à l'attitude (Miao and Wei, 2016).

H5 : Les **normes personnelles** et **normes morales** issues des croyances des individus ont tendance à affecter positivement l'intention d'adopter des écogestes (D. Li et al., 2019 ; J. Wang et al., 2019).

H5.1 : **La responsabilité** est positivement liée à la norme morale (De Groot and Steg, 2007).

H5.2 : La conscience des conséquences est positivement liée à la norme morale.

H6 : Il existe un lien positif entre **l'adoption actuelle des écogestes** et l'intention de les adopter dans le futur.

H7 : La conscience environnementale est positivement liée à l'intention d'adopter un comportement pro-environnemental (Kim and Choi, 2005).

H8 : Les **habitudes** impactent positivement le comportement (Linder et al., 2022).

Dans la figure ci-dessous nous proposons le schéma sur lequel se base notre étude théorique visant à définir les facteurs influents sur le comportement d'usage d'énergie au sein du bâtiment :

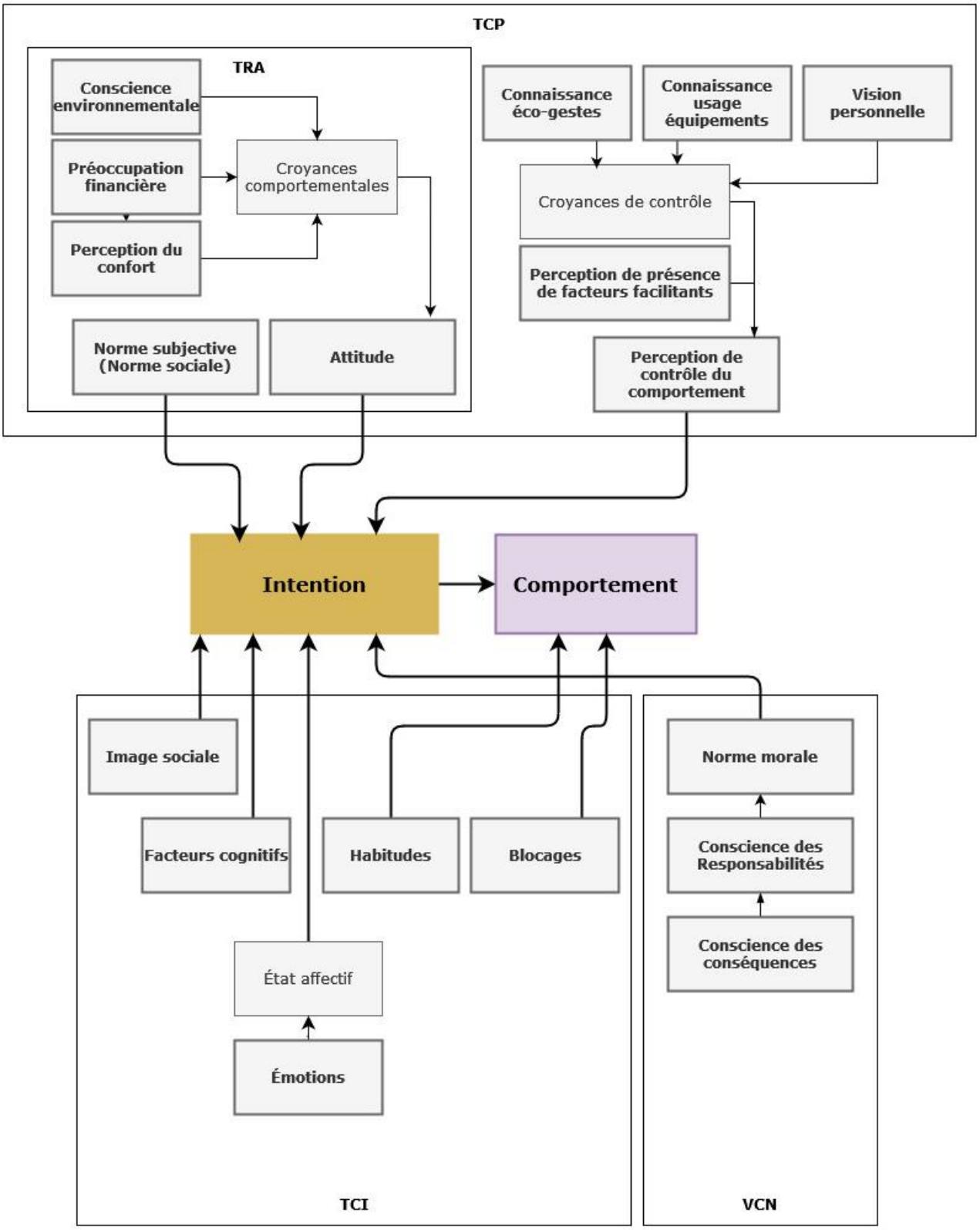


Figure 57 : Schéma des facteurs pris en considération de l'étude inspiré de certaines théories du comportement

En plus des facteurs affectant le comportement et influant l'adoption des écogestes en vue de la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment, nous nous sommes aussi attardés sur les points qui pourraient favoriser l'impact de certaines incitations plus que d'autres. L'objectif de cette étape est de pouvoir, une fois les profils déterminés, affecter suivant les réponses des occupants le type d'incitation susceptible d'avoir plus d'impact sur son comportement. Pour cela nous avons dressé la liste des hypothèses ci-dessous :

H9 : L'esprit de compétition élevé répond au besoin de l'individu de se distinguer et gagner. Dans ce cas, un environnement où est installée une compétition par rapport à la réduction des consommations, ou une comparaison avec d'autres occupants sont des éléments favorables pour amener du changement.

H10 : Une personne avec une conscience environnementale élevée est sensible aux messages et images qui montrent l'impact de nos comportements sur l'état de la planète.

H11 : Les encouragements et les remerciements ainsi que la satisfaction interne de ses propres gestes peuvent amener l'individu en besoin de reconnaissance à adopter le bon comportement.

Nous avons aussi fait l'hypothèse de certains facteurs qui pourraient représenter un blocage quant au passage à l'action :

H12 : L'oubli, le manque de temps, le manque d'intérêt, la difficulté de garder le rythme, et la paresse représentent des blocages quant au comportement pro-environnemental dans la consommation de l'énergie dans le bâtiment.

1.2 *Création du questionnaire*

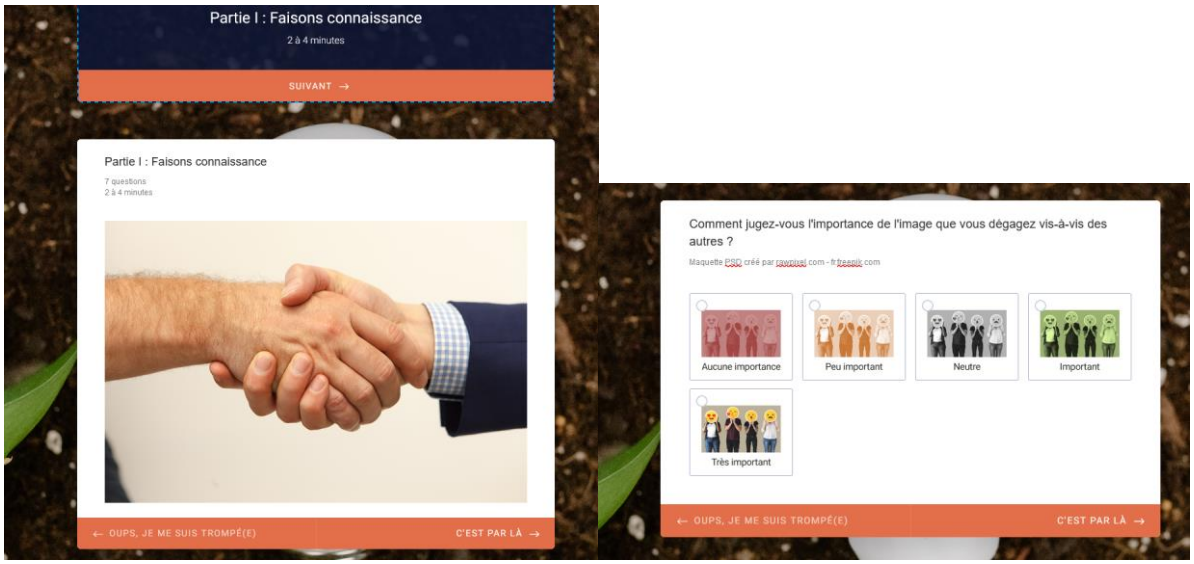
1.2.1 *Objectifs et structure*

Le choix de l'utilisation d'un questionnaire dans le cadre de notre objectif se base sur le fait que c'est un outil utilisé par les travaux de littérature (D. Li et al., 2019c) (Salimi and Hammad, 2019) (O'Brien et al., 2020) dans le cadre de l'étude des comportements. L'utilisation du questionnaire dans le cas de notre étude remplit un double objectif. D'abord comme source complémentaire de données pour mieux simuler le comportement des occupants dans la simulation thermique comme a été le cas dans les travaux de (He et al., 2021) (Day et al., 2012) et comme nous l'avons utilisé dans la partie 3.1.3 du chapitre III; mais aussi comme moyen pour étudier le comportement des occupants d'un point de vue comportementales c.-à-d. en utilisant les théories du comportement. Pour ce deuxième volet le but du questionnaire (voir Annexe 1) est le suivant :

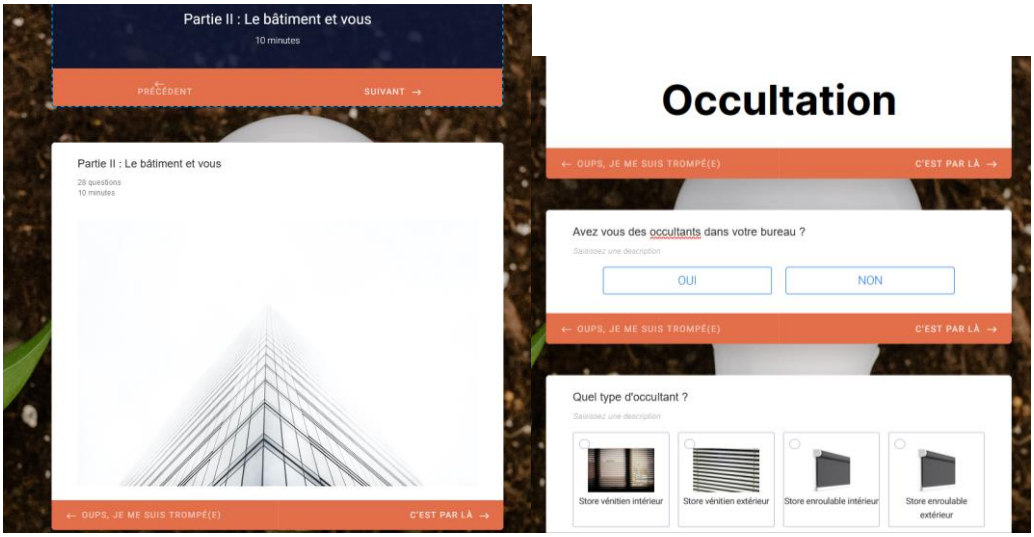
- Évaluer les facteurs affectant le comportement d'usage de l'énergie dans le bâtiment en se basant sur l'étude théorique préalablement présentée.
- Déterminer les comportements énergivores dans le bâtiment.
- Connaitre l'usage actuel de l'énergie au sein du bâtiment de la part des occupants pour pouvoir déterminer les éventuelles pistes de changement de comportement.
- Déterminer les incitations les plus susceptibles d'avoir un impact sur l'occupant interrogé.
- Déterminer les points de blocages qui pourraient empêcher l'adoption de comportements visant la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.

Pour ce qui est de la structure du questionnaire, nous avons scindé ce dernier en cinq parties comme suit :

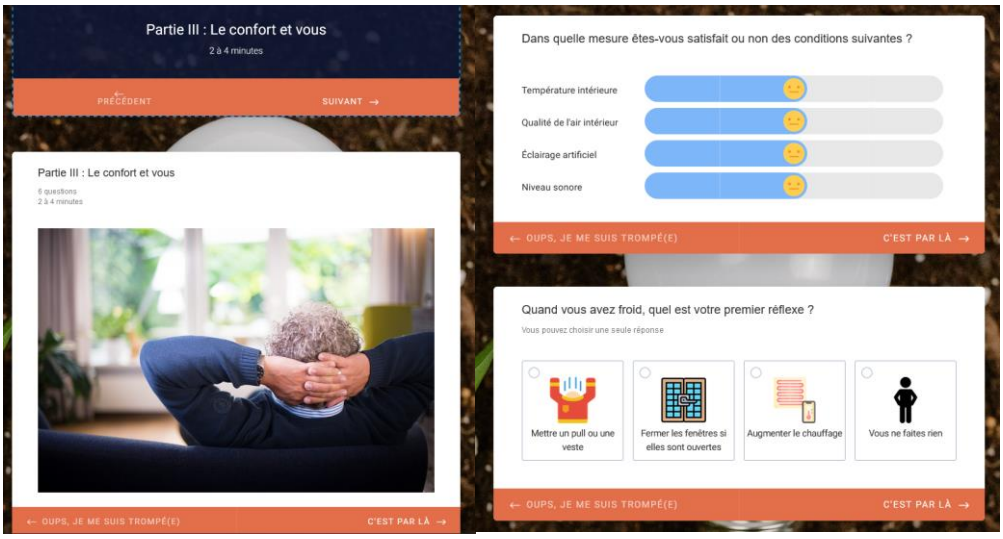
- *Partie I : Faisons connaissance (7 questions) :* L'objectif de cette partie est d'obtenir des informations sociodémographiques des répondants et de connaitre leurs caractéristiques personnelles notamment celles liées aux incitations qui pourraient avoir plus ou moins d'impact sur leur comportement.



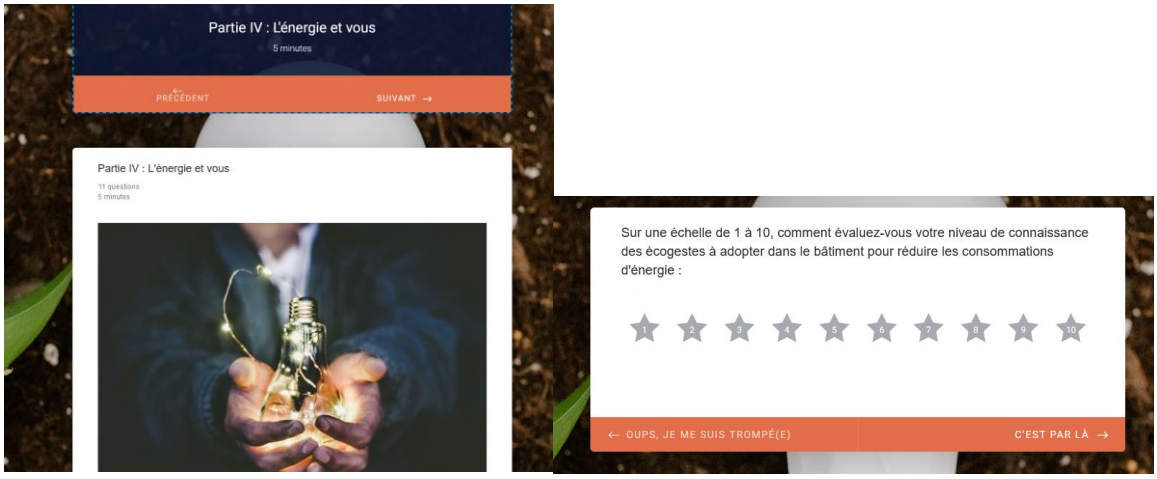
- *Partie II : Le bâtiment et vous (28 questions) :* Le but de cette partie est de connaitre l'interaction du répondant avec les systèmes énergétiques du bâtiment et les conditions d'usage de l'énergie. Pour mieux comprendre la relation intention – action et à quel niveau les NUDGES peuvent impacter le changement de comportement des occupants, il est important d'avoir une idée sur :
  - Le degré de liberté et l'accès aux différents points de contrôles de l'occupant.
  - Les raisons derrière les différentes interactions avec le bâtiment.
  - Les comportements qui peuvent causer des surconsommations.



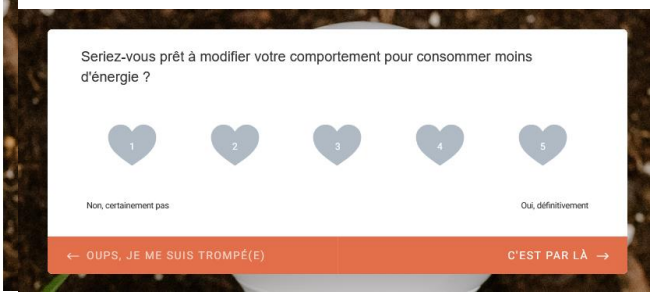
- *Partie III : Le confort et vous (6 questions) :* cette partie est dédiée à la perception de confort chez les répondants et les situations d'inconforts. La priorité du confort dans la prise de décisions est aussi questionnée.



- *<u>Partie IV : L'énergie et vous (11 questions) :</u>* L'objectif de cette partie est de connaitre le niveau de connaissance de l'énergie chez les répondants et leur vision par rapport à son usage.



- *<u>Partie V : Vos intentions VS vos actions (12 questions) :</u>* dans cette partie, le questionnaire interroge sur les motivations qui pourraient dicter le comportement des occupants et les points de blocages qui empêcheraient l'adoption d'écogestes.



1.2.2 *Critères de forme et de contenu*

Dans notre méthodologie de création de questionnaire, nous avons accordé une importance primordiale à la forme pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous avons veillé à ce que celui qui répond ne s'ennuie pas tout au long du processus. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé des images pertinentes et attrayantes afin de faciliter la compréhension des questions. Ces visuels ont ajouté une dimension stimulante, rendant l'expérience plus engageante.
Nous avons utilisé pour cela la plateforme Jotform[39] qui permet plusieurs fonctionnalités dans le cadre de la création de questionnaire notamment enregistrer les réponses pour pouvoir y répondre ultérieurement.
Nous avons aussi tâché d'envoyer le questionnaire en deux langues : français et anglais afin que les occupants puissent bien comprendre les questions et répondre convenablement.

Au niveau de la structure, nous avons travaillé consciencieusement pour bien séparer les différentes parties du questionnaire. En utilisant des divisions claires, nous avons créé une progression logique et intuitive tout au long du questionnaire. Cela permet aux participants de se sentir guidés à travers les différentes sections, facilitant ainsi leur expérience de réponse.
Un autre aspect important de notre approche a été de placer le participant au cœur de l'expérience. Pour ce faire, nous avons utilisé le mot "vous" dans tous les titres. Cette approche personnalisée a pour objectif d'impliquer directement le participant, le mettant ainsi au centre de l'attention et renforçant son engagement avec le questionnaire.

De plus, pour chaque partie du questionnaire, nous avons clairement indiqué le nombre de questions et le temps estimé de réponse. Cette transparence permet aux participants de mieux planifier leur temps et de se préparer mentalement à la durée nécessaire pour répondre à chaque section. En fournissant ces informations, nous cherchons à garantir une expérience fluide et respectueuse du temps des participants.

Enfin, nous avons opté pour une plateforme interactive pour rendre l'expérience globale agréable et ludique. En utilisant des fonctionnalités interactives telles que des éléments cliquables et des animations, nous avons créé un environnement dynamique qui stimule l'intérêt

[39] https://eu.jotform.com/myforms/?path=%2Fmyforms

et la participation active. Cette approche interactive vise à rendre le processus de réponse plus plaisant, encourageant ainsi les participants à donner des réponses authentiques et réfléchies.

En ce qui concerne le contenu, nous avons veillé à utiliser des questions claires et ciblées et lever toute possibilité d'ambiguïté dans la compréhension des questions ou des choix. Les images ont été utilisées pour mieux visualiser certaines réponses. Toutes les questions contiennent la possibilité de proposer une autre réponse afin de donner au répondant la possibilité de répondre plus librement et fournir le maximum d'informations possibles.

1.2.3 *Évaluation des facteurs par questionnaire*

Comme pour d'autres travaux que nous avons indiqués dans la partie 5 du chapitre III, nous utilisons les différentes réponses des occupants afin de noter sur des échelles correspondantes les valeurs respectives des 14 facteurs énumérés ci-dessous, et que nous avons établis à partir de notre étude théorique et des hypothèses émises dans la partie 1.1 du chapitre III. Pour les repérer facilement, nous attribuons à chaque facteur un numéro précédé de la lettre F. D'autres paramètres ont aussi été évalués. Ils sont liés cette fois ci aux incitations qui auraient plus d'impact sur les intervenants. Nous leur attribuons à chacun un chiffre précédé de la lettre N en référence cette fois-ci au Nudges.
Les questions liées à chaque facteur et le processus d'attribution des notes sont détaillés dans le Tableau 35 ci-dessous :

Facteur	Nomination	Explication	Questions	Échelle
L'intention d'adopter des écogestes	**F1-Intention**	En réponse à la question si l'individu était prêt à changer de comportement afin de consommer moins d'énergie au sein du bâtiment.	Seriez-vous prêt à modifier votre comportement pour consommer moins d'énergie ? (à noter entre 1 et 5)	1 à 5
Vision personnelle	**F2-Vision_perso**	En réponse à la question comment le répondant juge son comportement.	Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) : Parmi les choix : « Ça procure une satisfaction intérieure » Sur une échelle de 1 à 5, à quel point considérez-vous votre comportement comme écologique ?	1 à 5
Connaissance de l'usage des équipements	**F3-Connai_équip**	Dans cette question, nous nous sommes basées essentiellement sur l'exemple du thermostat comme système d'usage d'énergie pas communément facile à manipuler par tous les occupants.	Dans le cas où vous avez la possibilité de changer la consigne de chauffage, savez-vous utiliser le boitier de chauffage dans votre espace de travail ? : « Oui, je connais la fonction de tous les boutons » ; « Je sais juste comment augmenter et diminuer la consigne » ; « Non pas du tout j'évite d'y toucher d'ailleurs »	1 à 3
Connaissance des écogestes	**F4-Connai_écogestes**	Représente le niveau de connaissance des répondants aux écogestes à adopter au sein du bâtiment.	Sur une échelle de 1 à 10, comment évaluez-vous votre niveau de connaissance des écogestes à adopter dans le bâtiment pour réduire les consommations d'énergie	1 à 10
Facteurs facilitants	**F5-Facteurs_facilitants**	Évalue la présence aux yeux du répondant de facteurs facilitants son adoption du comportement pro-environnemental quant à l'usage de l'énergie.	Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) : Parmi les choix : « C'est facile ! »	1 à 5
Attitude	**F6-Attitude**	Représente le jugement porté par le répondant envers les actions de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment. S'agit-il d'un jugement positif ou négatif.	Si l'un de vos collègues adopte un écogeste pour réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment, qu'en pensez-vous ? Ça peut causer de l'inconfort ; C'est une perte de temps ; Rien ; C'est bien mais vous n'avez pas l'intention de faire de même ; C'est bien et vous essayez de suivre son exemple	1 à 4
Conscience énergétique	**F7-Consc_énergétique**	Est évaluée par l'importance que donne le répondant à la nécessité de réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment.	6 systèmes liés à l'énergie dans le bâtiment ; la même question : « Quelle motivation pourrait vous pousser à … » (Exemple : Ouvrir les fenêtres, éteindre l'éclairage…). Parmi les choix : « Économiser l'énergie »	1 à 5

Confort perçu	**F8-Confort**	Évalué par l'importance donnée au confort par rapport aux éco-gestes.	Seriez-vous prêt à travailler avec moins de confort afin de consommer moins d'énergie ? (à noter de 1 à 5) Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) : Parmi les choix : « Mon confort sinon je ne le fais pas »	1 à 5
Norme morale	**F9-Norme_morale**	Évaluée par le sentiment de culpabilité est l'obligation morale pour effectuer des actions de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.	Quel est votre ressenti envers les actions de réduction des consommations énergétiques dans les bâtiments ? : « Moralement obligé » ; « Sentiment de culpabilité si vous ne les faites pas » ; « Bien si je les fais, mais aucun regret si je ne les fais pas » ; « Neutre » ; « Je n'en vois pas l'intérêt »	1 à 3
La responsabilité	**F10-Responsabilité**	Représente à quel niveau le répondant se sent responsable de réduire ses consommations énergétiques dans le bâtiment.	À votre avis, les mesures de réduction des consommations énergétiques dans votre bâtiment sont de la responsabilité : « De tous les occupants, de leur propre initiative » ; « De tous les occupants, avec une politique dédiée et un suivi continu » ; « Du gestionnaire d'énergie dans le bâtiment avec des solutions » ; « De la Direction ou du gestionnaire du site »	1 à 4
Adoption des éco-gestes	**F11-Adopt_écogestes**	Évaluée par le niveau d'adoption de certains éco-gestes au sein du bâtiment.	Pour une liste de 8 écogestes, Question : A quelle fréquence effectuez-vous les actions suivantes de réduction des consommations dans les bureaux (jamais, rarement, parfois, souvent, toujours)	1 à 5
Conscience environnementale	**F12-Consc_env**	Représente le degré de souci que porte le répondant envers les problématiques environnementales	Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) : Parmi les choix : « Réduire l'impact environnemental »	1 à 5
Habitude	**F13-Habitude**	Vérifie si l'habitude est une raison essentielle pour effectuer des actions de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.	Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) : Parmi les choix : « Ça fait partie de mes habitudes »	1 à 5
Présence de blocages	**F14-Blocages**	Recense le nombre de blocages perçus par les répondants quant aux actions de réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment.	Dans le cas où vous ne réalisez pas certaines actions de réduction des consommations énergétiques dans le bureau, qu'est-ce qui vous en empêche ? « Paresse » ; « Oubli » ; « Difficile de garder le rythme » ; « Manque de temps » ; « Je ne suis pas seul dans le bureau »	1 à 5

Esprit de compétition	**N1-Compétition**	La compétition amène-elle le répondant à changer de comportement	Sur une échelle de 1 à 5, comment jugez-vous votre esprit de compétition (5 étant un esprit de compétition très élevé)	1 à 5
Reconnaissance	**N2-Reconnaissance**	Évalué par le niveau de sensibilité envers les encouragements et les remerciements et l'importance de l'image interne pour le répondant.	À quel point les encouragements et les remerciements sont importants pour vous ? (Noter sur une échelle de 1 à 5)	1 à 5
Norme subjective ou norme sociale	**N3-Norme_sociale**	Évalué par l'importance de l'image de la personne interrogée aux yeux de son entourage en ce qui concerne ses comportements envers l'usage de l'énergie dans le bâtiment.	Comment jugez-vous l'importance de l'image que vous dégagez vis-à-vis des autres ? (Noter sur une échelle de 1 à 5) Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) : Parmi les choix : « Ça donne une bonne image de moi »	1 à 5

Tableau 35**: Détermination des facteurs nécessaires pour l'étude à partir des réponses au questionnaire**

En plus de pouvoir noter les facteurs que nous venons de présenter, le questionnaire nous permet de recueillir des informations supplémentaires qui nous permettront de mieux analyser les consommations d'énergie dans le bâtiment. Dans ce qui suit nous procéderons donc à l'analyse des réponses du questionnaire afin de :

- Recenser les comportements énergivores dans le bâtiment.
- Comprendre les motivations derrière l'adoption des éco-gestes ou le cas échéant les blocages qui pourraient les empêcher.
- Étudier les corrélations entre les 14 facteurs précédemment cités et l'adoption du comportement pro-environnemental dans l'usage de l'énergie dans le bâtiment.

1.2.4 *Analyse des résultats du questionnaire*

L'importance de cette partie est de présenter de plus près les caractéristiques de l'échantillon étudié et certaines constatations liées à l'usage de l'énergie par les occupants dans le bâtiment, leurs motivations et leurs priorités. Le nombre de personnes qui ont répondu au questionnaire s'élève à 51 répondants.
Nous sommes dans un contexte de bâtiment école où l'usage des outils informatiques est très présent avec absence de souci financier pour les occupants qui ne paient pas la facture énergétique. Nous résumons dans ce qui suit les réponses qui offrent des informations complémentaires en ce qui concerne l'échantillon et l'usage de l'énergie dans le bâtiment. Le questionnaire complet est à consulter dans Annexe 1.

Partie I : Faisons connaissance

Nous avons obtenu 51 réponses (31 hommes et 20 femmes). Les tranches d'âges sont à 31 % entre 26 et 30 ans et à 21 % entre 21 et 25 et 19 % entre 30 et 40 ans. 8 % des répondants ont entre 36 et 40 ans et 6 % entre 51 et 55.

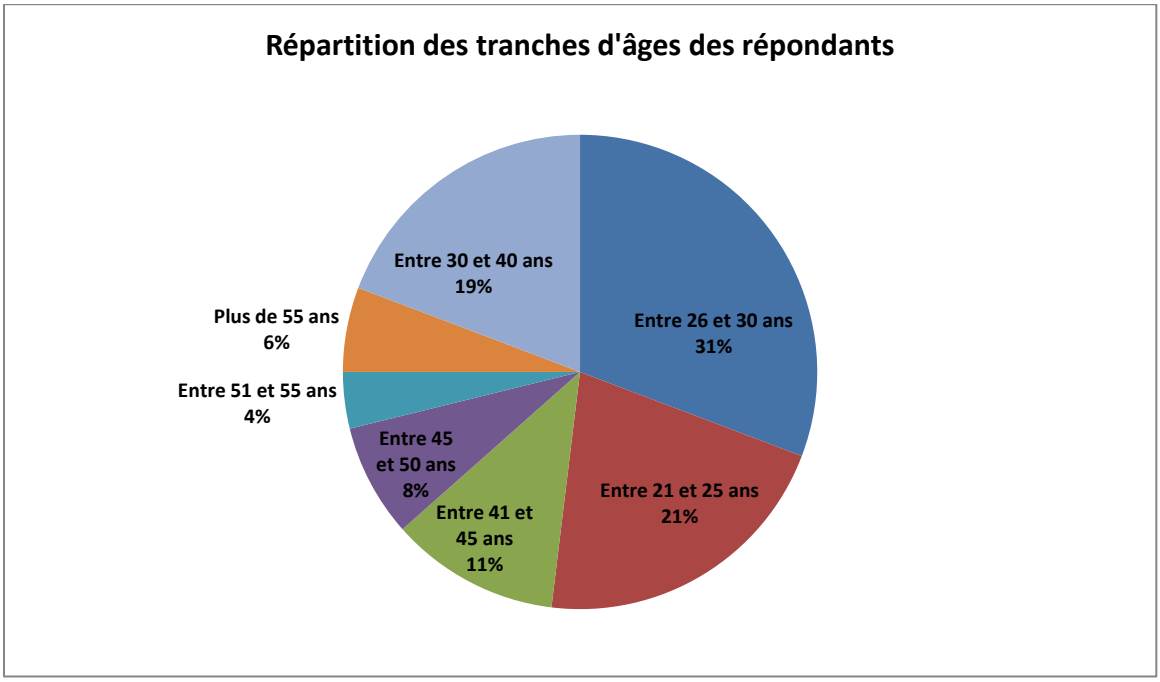


Figure 58 : Répartition des tranches d'âges des répondants

Partie II : Le bâtiment et vous :

En ce qui concerne les comportements énergivores repérés par les occupants dans leur bâtiment, le questionnaire comporte la question suivante : *Avez-vous repéré dans votre bâtiment l'un des comportements suivants menant à des consommations inutiles d'énergie ?* avec une proposition d'une liste de 7 comportements. On retrouve à parts égales tous les comportements proposés aux répondants. Ceci nous permet d'orienter les efforts de façon égale vers toutes les possibilités d'écogestes dans le bâtiment.

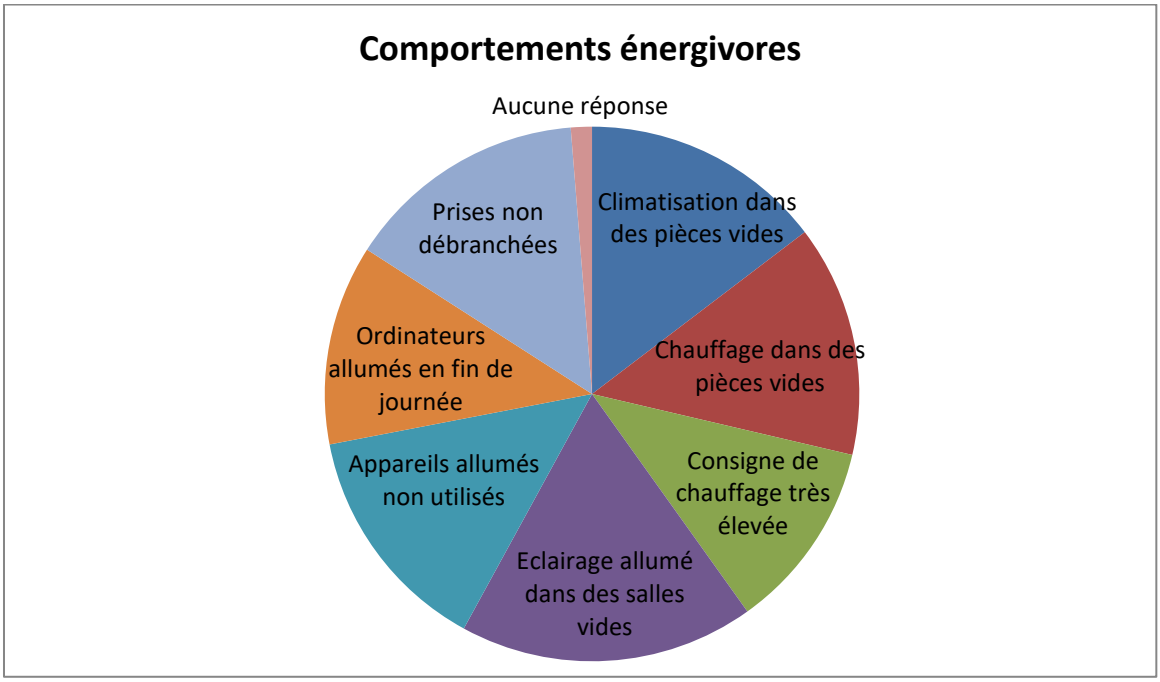


Figure 59 : Comportements énergivores dans le bâtiment repérés par les occupants

Partie III : Le confort et vous :

Il est important d'évaluer le niveau de confort des occupants dans le bâtiment afin de comprendre leurs comportements mais aussi afin d'éviter de créer un inconfort chez les occupants en encourageant certains écogestes. Le but de cette partie est de :

- Évaluer le niveau de confort dans l'espace de travail de la personne interrogée.
- Estimer le compromis que peut faire l'occupant entre son propre confort et les consommations d'énergie.

65 % des occupants se sentent bien dans leurs bureaux et trouvent que leur lieu de travail n'est ni très chaud ni très froid. La majorité est satisfaite ou très satisfaite de la température intérieure. La chaleur présente un peu plus d'inconfort que le froid pour les occupants (20 % et 17 % respectivement). Il en est de même pour l'éclairage dont 44 % sont satisfaits et 15 % très satisfaits. Les occupants ne sont pas non plus nombreux à être insatisfaits de la qualité de l'air ni du niveau sonore (Figure 60).

Quel est votre ressenti général dans votre espace de travail ? Vous trouvez qu'il est ?

65%
Percentage

Data	Response	%
Ni chaud , ni froid	34	65%
Légèrement chaud	6	12%
Chaud	5	10%
Légèrement froid	4	8%
Très chaud	2	4%
Froid	1	2%

Dans quelle mesure êtes-vous satisfait ou non des conditions suivantes ?

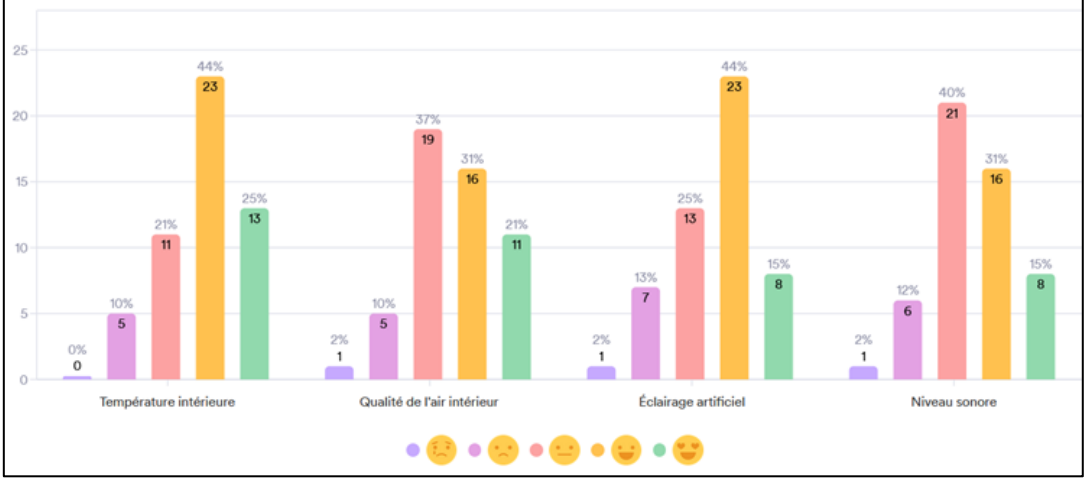


Figure 60 : Confort perçu par les occupants relevé par le questionnaire

Nous concluons de ce qui précède que des actions liées à l'usage des fenêtres, des occultations et de l'éclairage ne risquent pas d'affecter le niveau de confort des occupants.
En ce qui concerne le dilemme entre confort et consommation d'énergie. La majorité des occupants disent être prêts à fermer les fenêtres ou enfiler un pull en cas de sensation de froid au lieu d'augmenter la consigne de chauffage. Cet exemple montre que les occupants sont prêts à chercher d'autres solutions à la situation d'inconfort avant de penser à consommer inutilement de l'énergie. De même seules 34 % des réponses affirment ne pas être prêts à sacrifier un peu de confort pour moins de consommations d'énergie.
Finalement, en ce qui concerne les solutions proposées par les occupants afin d'améliorer leur confort vis-à-vis de l'impuissance devant les systèmes du bâtiment, nous citons ci-dessous certaines réponses :

- Mettre des vêtements plus chauds en cas de froid.
- Mettre des vêtements légers en périodes chaudes.
- Favoriser la ventilation naturelle pour refroidir le bureau.
- Protections solaires avec des moyens locaux (calendriers ou des cartons).
- Changer de pièce.

Partie IV : L'énergie et vous :

Le but de cette partie est de :

- Identifier la perception de la personne interrogée par rapport aux consommations d'énergie dans le bâtiment.
- Évaluer le niveau de connaissance par rapport aux comportements énergivores dans le bâtiment.

Face à la question de la perception de l'énergie en tant que consommation, coût, évolution de consommation ou d'impact environnemental (*Quel terme associez-vous à la consommation d'énergie ? kWh ; Prix ; Augmentation ou réduction de consommation énergétique ; Impact carbone (CO2)),* nous remarquons que le mot « énergie » est à 37 % lié à kWh c'est-à-dire consommations, à 23 % au prix et à l'impact carbone (CO_2) et à 16 % au changement des consommations d'énergie et leur évolution (Figure 61).

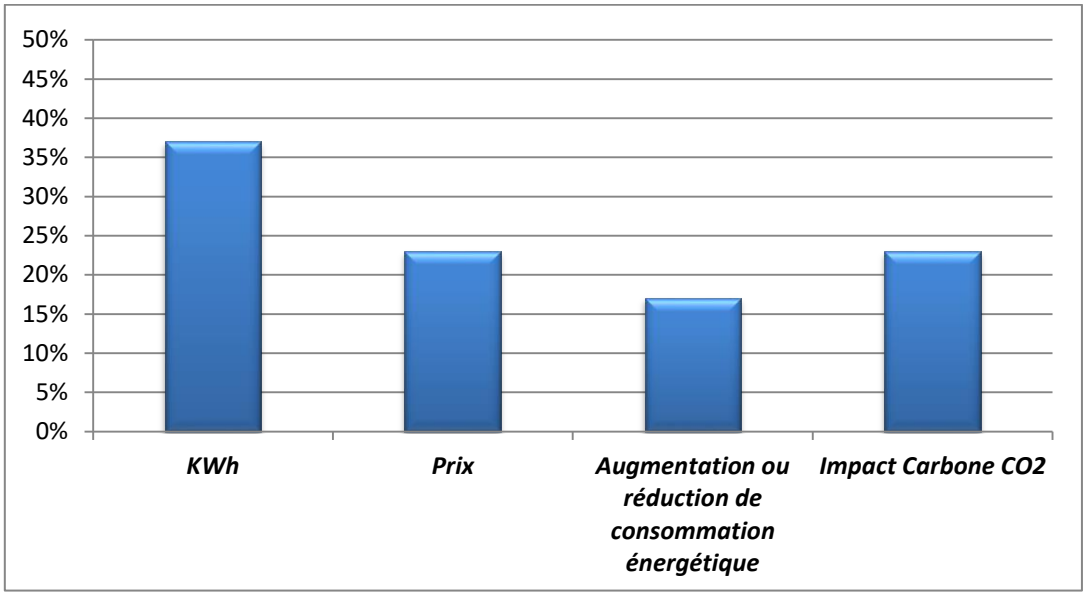


Figure 61 : Réponses des occupants à la question : ***Quel terme associez-vous à la consommation d'énergie ? kWh ; Prix ; Augmentation ou réduction de consommation énergétique ; Impact carbone (CO2))***

Pour ce qui est de la connaissance des écogestes, la moyenne des réponses est 6,5 sur une échelle de 10. 53 % des répondants jugent qu'ils font attention à leurs consommations dans le bâtiment. La plupart des occupants sont intéressés par les consommations du bâtiment, par une comparaison avec les autres bureaux mais aussi par leurs propres consommations. Une représentation par des graphes visuels est à 41 % préférée par les occupants. En deuxième place viennent les valeurs numériques (27 %), ensuite les mots et les explications (18 %) et enfin les images expressives (12 %).

Nous résumons les résultats de cette première analyse des réponses au questionnaire par ce qui suit :

- L'échantillon étudié est caractérisé par le fait d'être un échantillon jeune avec un grand pourcentage d'âge entre 20 et 40.

- Les surconsommations d'énergie sont réparties de façon égale entre les différents postes. Tous les écogestes que nous avons présentés dans la partie 5 du chapitre III sont donc à proposer aux occupants.
- Les occupants sont généralement satisfaits du niveau de confort actuel dans le bâtiment en ce qui concerne les différents postes : chauffage, climatisation, éclairement, confort sonore, qualité de l'air. Une telle situation facilite le lancement d'une expérimentation qui implique les occupants et l'usage des différents systèmes. Les situations d'inconforts peuvent être aussi facilement relatées.
- Afin de mieux comprendre la vision des occupants par rapport à l'usage de l'énergie dans leur espace de travail, nous avons utilisé la question : (*Quel terme associez-vous à la consommation d'énergie ? kWh ; Prix ; Augmentation ou réduction de consommation énergétique ; Impact carbone (CO2).* Les réponses obtenues montrent que la notion de consommation est la plus répandue. Il existe aussi une égalité entre la perception financière et la perception d'impact carbone chez la population étudié.
  Cette information sera utilisée dans la partie 2.2 qui va suivre dans le choix des nudges à appliquer aux occupants suivant ce que représente l'énergie pour eux.
- Finalement, et dans la continuité du choix des nudges et de l'outil de communication avec les occupants, les réponses recensées permettent de choisir le message le plus adéquat à communiquer aux occupants dans le cadre de l'expérimentation.

Après avoir analysé les réponses de l'échantillon étudié, nous allons évaluer la cohérence interne de l'échantillon et les corrélations entre les facteurs présentés précédemment. Pour cela, nous commençons par une mesure de l'alpha de Cronbach. Cette mesure nous permettra de savoir si les différents facteurs calculés préalablement se rejoignent pour mesurer de façon cohérente le concept étudié. Nous présentons ensuite la matrice de corrélation entre les différents facteurs afin d'étudier les corrélations surtout avec le facteur lié à l'intention de changer le comportement chez les occupants.

1.3 *Les facteurs influents sur l'intention d'adopter des écogestes*

1.3.1 *Matrice de corrélation (alpha de cronbach)*

L'utilisation d'un questionnaire dans le cadre de notre étude induit une vérification de la consistance des réponses obtenues de la part des répondants pour chaque paramètre investigué. Il est essentiel d'analyser la cohérence interne afin d'évaluer la fiabilité du questionnaire. L'alpha de Cronbach est une mesure couramment utilisée pour une telle vérification. Une valeur élevée de l'alpha de Cronbach indique une plus grande cohérence.
Nous procédons donc à un calcul du paramètre Alpha de Cronbach α à l'aide du logiciel SPSS[40]. Ce paramètre doit être au minimum supérieur à 0,7 afin d'assurer que le paramètre étudié est consistant et représentatif dans le cadre de l'étude.

Nous obtenons, en considérant les paramètres présentés précédemment pour la génération des profils (de F1 à F14), une valeur α=0,742. Ce résultat est satisfaisant et nous permet donc de baser notre génération de profils sur ces paramètres. En effet, ce résultat montre une cohérence entre les différents paramètres.

Dans un second temps, nous examinons les relations entre les différents paramètres tirés de notre questionnaire en utilisant une matrice de corrélation. Une telle analyse nous permettra de déterminer l'existence ou non d'associations entre les différents facteurs. Vu que l'intention de

[40] SPSS : Statistical Package for the Social Sciences

changer le comportement (**F1-Intention)** est le facteur essentiel dans le cadre de notre étude, nous nous focaliserons sur les corrélations entre ce facteur et les autres facteurs.

La **Figure 62** ci-dessous représente la matrice de corrélation dans le cadre de notre étude.
D'après cette matrice, nous pouvons remarquer ce qui suit :

- Certains facteurs présentent des corrélations importantes entre eux. Par exemple, le facteur **F5-Facteurs_facilitants** est fortement corrélé avec **F7-Consc_énergétique** (0.443) et **F11-Adopt_écogestes** (0.56), ce qui suggère que les facteurs facilitant l'adoption de comportements énergétiques sont associés à la conscience énergétique et à l'adoption d'éco-gestes. Le facteur **F11-Adopt_écogestes** présente lui aussi de fortes corrélations avec **F2-Vision_perso (0.56)**, **F6-Attitude (0.325)** et **F12-Consc_env (0.407)**. Cela signifie que l'adoption d'éco-gestes est influencée par la vision personnelle, l'attitude et la conscience environnementale.
- La matrice de corrélation montre une corrélation inverse entre certains facteurs traduite par des corrélations négatives. Le facteur **F8-Confort** présente une corrélation négative avec les autres facteurs et en particulier **F7-Consc_énergétique (-0.346)**. Cela montre que le confort perçu est en opposition avec la conscience énergétique, les écogestes, l'intention de changer le comportement. De même, **F14-Blocages** présente des corrélations négatives avec plusieurs autres facteurs. Ce résultat est logique vu que les blocages ne permettent pas d'effectuer des écogestes, est vont à l'encontre de l'intention de changer de comportement.
- Les facteurs représentant les incitations : N1, N2, N3 présentent des corrélations faibles avec les autres facteurs. Il s'agit là d'un résultat compréhensible vu que ces facteurs sont liés aux nudges à appliquer aux occupants plus qu'aux comportements des occupants.
- Finalement, le facteur sujet de l'étude **F1-Intention** est significativement corrélé avec plusieurs facteurs. Nous citons **F2-Vision_perso (0.51)**, **F7-Consc_énergétique (0.68), F8-Confort (-0.218)** et **F12-Consc_env (0.599).** Ces facteurs peuvent donc jouer un rôle important dans l'intention de changer de comportement chez les occupants.

Dans la partie 5 du chapitre II, nous avons cité les facteurs dictant le comportement des occupants dans la littérature. Parmi ces facteurs, les facteurs sociodémographiques ont fait objet de plusieurs études. Dans la partie suivante, nous étudions le lien entre les facteurs sociodémographiques que nous avons pu collecter par questionnaire et l'intention de changer de comportement.

	F1-Intention	F2-Vision_perso	F3- F4 Connaissance	F5-Facteurs_facilitans	F6-Attitude	F7-Consc_énergétique	F8-Confort	F9-Norme_morale	F10-Responsabilité	F11-Adopt_écogestes	F12-Consc_env	F13-Habitude	F14-Blocages	N1-Compétition	N2-Reconnaissance	N3-Norme_sociale
F1-Intention	1															
F2-Vision_perso	0.51	1														
F3- F4Connaissance	0.163	0.139	1													
F5-Facteurs_facilitans	0.173	0.135	0.291	1												
F6-Attitude	0.56	0.206	0.152	0.042	1											
F7-Consc_énergétique	0.68	0.443	0.36	0.25	0.307	1										
F8-Confort	-0.218	0.073	0.034	0.046	-0.205	-0.346	1									
F9-Norme_morale	0.395	0.298	-0.031	0.21	0.207	0.281	-0.314	1								
F10-Responsabilité	0.243	0.234	-0.002	0.246	0.013	0.167	-0.128	0.113	1							
F11-Adopt_écogestes	0.443	0.56	-0.002	-0.058	0.181	0.325	0.022	0.121	-0.001	1						
F12-Consc_env	0.599	0.379	-0.025	-0.205	0.34	0.493	-0.083	0.207	0.006	0.407	1					
F13-Habitude	0.254	0.262	0.23	0.162	0.192	0.076	-0.083	0.177	0.265	0.16	-0.059	1				
F14-Blocages	0.024	-0.079	-0.238	-0.053	0	0.033	0.093	-0.105	0.156	-0.155	-0.128	-0.167	1			
N1-Compétition	-0.003	0.024	0.218	0.057	0.011	-0.002	-0.038	0.284	0.269	-0.094	-0.066	0.168	-0.025	1		
N2-Reconnaissance	0.474	0.257	-0.112	0.135	0.197	0.282	-0.025	0.152	0.233	0.224	0.492	0.064	0.077	0.069	1	
N3-Norme_sociale	0.007	-0.024	-0.05	0.062	0.006	-0.067	0.14	0.101	-0.06	0.005	0.027	-0.002	-0.126	0.097	0.468	1

Figure 62: Matrice de corrélation des 17 variables étudiés

1.3.2 *Impact des facteurs sociodémographiques*

Nous nous intéressons au lien qui peut exister entre les facteurs sociodémographiques : le genre, l'âge et la fonction (poste occupé par l'occupant) respectivement et l'intention de changer de comportement pour réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment. Pour cela, nous réalisons une analyse de variance à un facteur sur les 51 réponses reçues.

Pour cela nous procédons à une analyse de variance (ANOVA) à un seul sens avec un seul facteur. Nous utilisons le logiciel statistique comme SPSS pour effectuer l'ANOVA unifactorielle. Nous examinons la valeur de p. Les résultats obtenus indiquent qu'il n'y pas de différence significative entre les hommes et les femmes dans l'intention de changer de comportement pour réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment (p=0,33). La valeur de p étant supérieure au seuil de significativité de 0,05 suggère qu'il n'existe pas suffisamment de preuves statistiques pour prouver l'existence d'un lien significatif entre le genre et l'intention de changer le comportement de notre échantillon.

Il est cependant important de noter que ce résultat est basé sur un échantillon de taille limitée (51 participants) qui pourrait influencer la capacité à détecter de petites différences. Par conséquent, des études futures avec des échantillons plus importants pourraient être nécessaires pour confirmer ces résultats.

Nous effectuons la même étude dans le cas de l'âge et la fonction des occupants. Nous ne retrouvons pas non plus que la différence des tranches d'âges est associée à l'intention de changer de comportement (p=0,41). Il en est de même pour les postes qu'occupent les participants dans le bâtiment : responsables, techniciens, staff administratif, doctorants, enseignants (p=0,99).

Nous avons également examiné l'impact des 13 paramètres définis préalablement (de F2 à F14) sur l'intention de changer le comportement pour réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment. Les résultats ont montré que le modèle construit à partir de ces paramètres était significatif à un niveau de confiance de 1 % en ce qui concerne l'intention de changer le comportement. De plus, le coefficient de détermination R-carré (R^2) du modèle était de 0,656. Cela signifie que le modèle est capable d'expliquer environ 65,6% de la variance de l'intention de changer de comportement de l'échantillon étudié à travers les 13 paramètres utilisés.

On peut donc à travers ces résultats s'assurer de la validité du modèle et se baser sur les 13 paramètres (F2 à F14) pour prédire l'intention de changer le comportement en matière de consommations d'énergie dans le bâtiment.
Cela signifie aussi qu'on peut se baser sur ces paramètres afin de déterminer différents profils d'occupants à l'égard de l'intention de l'adoption de comportement de réduction des consommations d'énergie.

2 *Profils des occupants*

2.1 *Méthodologie*

L'objectif de cette partie est de créer des groupes d'occupants suivant les hypothèses de comportement définis préalablement et les paramètres qui leur sont liés. Cette étape est importante afin de déterminer les caractéristiques de chaque groupe, ce qui permettra de mettre en place des hypothèses d'interventions ciblées à appliquer à chaque groupe suivant les blocages et les motivations qui leur sont liés. Bien que notre échantillon soit restreint, composé de seulement 51 participants, il est important de souligner que notre approche de création de

groupes d'occupants selon leurs comportements et motivations vise à établir une méthodologie reproductible pour de futures recherches. Nous reconnaissons que les conclusions tirées de cet échantillon limité doivent être interprétées avec prudence. Cependant, notre objectif principal est d'explorer la possibilité d'établir un lien entre les profils d'occupants, leurs intentions de changement de comportement et l'impact de ces changements sur la réduction de la consommation d'énergie. En proposant notre méthodologie dans cette étude, nous espérons ouvrir la voie à des études ultérieures avec des échantillons plus vastes, afin de confirmer et d'affiner nos résultats.

Pour être en mesure de générer différents groupes d'occupants, nous nous basons sur la méthode de clustering k-means qui est bien adaptée à ce type de données.

- *Phase de prétraitement*

Avant de lancer le clustering, une phase de prétraitement des données s'impose. Il n'existe pas de données manquantes mais la différence d'échelles entre les différents paramètres nécessite une normalisation des données. Afin de transformer les données pour qu'elles soient sur la même échelle, nous appliquons une normalisation Min – Max qui permet de ramener chaque paramètre à un intervalle de [0,1]. Pour chaque paramètre, si nous considérons x_i comme la valeur qui correspond à la réponse i, la nouvelle valeur y_i sur un intervalle [0,1] est calculée comme suit :

$$y_i = \frac{x_i - \min_i x_i}{\max_i x_i}$$

Une fois toutes les données ramenées à la même échelle, nous procédons à un clustering afin de créer les profils des occupants.

- *Clustering*

Le clustering k-means est un algorithme de classification de données largement utilisé. Il permet de regrouper des observations similaires en sous-groupes distincts qu'on appelle clusters. Dans le cadre de notre étude, l'objectif du k-means est de définir des profils d'occupants en fonctions des facteurs collectés par le questionnaire. En regroupant les individus possédant des caractéristiques similaires, nous pouvons identifier des sous-groupes homogènes qui pourraient présenter des comportements similaires ou des préférences similaires par rapport à l'usage de l'énergie dans le bâtiment.

Le travail précédent sur la matrice de corrélation a montré des corrélations relativement faibles entre le facteur F14- Blocages et les autres facteurs. En prenant en compte cette observation, nous avons pris la décision de l'exclure comme facteur sur lequel se basera notre classification k-means. Ceci nous permettra aussi d'optimiser la qualité des clusters obtenus en réduisant le nombre de facteurs sur lesquels se base cette classification. Bien entendu, nous ne nous basons pas non plus sur les trois incitations : N1, N2, et N3, vu que leur premier rôle est la définition du nudge à appliquer. D'ailleurs ils présentent des corrélations faibles avec les autres facteurs.
Notre étude se base donc sur un total de 13 facteurs.

Le clustering k-means impose la définition d'un nombre de clusters pour réaliser son classement. Dans notre cas, nous ne disposons pas d'un nombre défini de clusters à créer. Cependant, dans le cadre de notre étude, il serait intéressant d'avoir au minimum 3 groupes, l'un exprimant un comportement complètement insoucieux envers la réduction des consommations d'énergie, l'autre à l'opposé complètement favorable à la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment et finalement un comportement intermédiaire représentant un groupe d'occupants avec des caractéristiques moyennes. En se basant sur ce choix, nous

choisissons un nombre de clusters compris entre 3 et 6 afin de vérifier la pertinence du choix définitif.

Dans le cadre de 3 clusters et vu le grand nombre de paramètres, il est difficile pour nous d'affecter des caractéristiques spécifiques à chaque groupe. Pour le choix de 6 clusters nous remarquons une répétitivité de certains paramètres ce qui induit que le nombre doit être réduit. Notre choix s'est donc réduit au cas de 4 et de 5 clusters car ils représentent le taux d'erreur le plus faible. Nous présentons dans le tableau ci-dessous les résultats du clustering pour ces deux cas (k= 4, k=5) (Tableau 36). Le tableau indique les centres finaux des groupes d'individus pour chaque facteur. Par exemple pour le facteur F1-Intention, nous pouvons distinguer cinq différents groupes d'individus. Pour le premier groupe, les valeurs du facteur F1-Intention ont comme centre 0,95.

Nombre de Clusters / Facteurs de comportements	**K = 4**				**K = 5**				
	Cluster 1	*Cluster 2*	*Cluster 3*	*Cluster 4*	*Cluster 1*	*Cluster 2*	*Cluster 3*	*Cluster 4*	*Cluster 5*
F1-Intention	0,95	0,52	0,68	0,77	0,94	0,70	0,49	0,73	0,65
F2-Vision_perso	0,71	0,54	0,68	0,56	0,74	0,20	0,86	0,67	0,75
F3-Connai_équip	0,64	0,50	0,53	0,62	0,65	0,65	0,56	0,63	0,38
F4-Connai_écogestes	0,69	0,83	0,34	0,57	0,76	0,71	0,44	0,55	0,47
F5-Facteurs_facilitans	0,80	0,48	0,78	0,62	0,79	0,55	0,50	0,67	0,65
F6-Attitude	1,00	0,44	0,48	1,00	0,97	0,70	0,46	0,96	0,43
F7-Consc_énergétique	0,81	0,17	0,73	0,34	0,81	0,49	0,04	0,33	0,63
F8-Confort	0,34	0,73	0,40	0,59	0,35	0,52	0,84	0,62	0,41
F9-Norme_morale	0,84	0,46	0,58	0,79	0,84	0,65	0,50	0,79	0,45
F10-Responsabilité	0,86	0,67	0,84	0,75	0,86	0,27	0,81	0,81	0,83
F11-Adopt_écogestes	0,54	0,54	0,52	0,55	0,55	0,60	0,56	0,55	0,48
F12-Consc_env	0,97	0,73	0,78	0,90	0,97	0,85	0,64	0,88	0,80
F13-Habitude	0,86	0,67	0,70	0,75	0,85	0,70	0,82	0,79	0,53

Tableau 36 : Centres finaux avec K = 4 et K = 5

Nous remarquons que certains profils se dégagent et se distinguent. Le paramètre le plus différenciant pour les profils est celui de l'intention de changer. En effet, notre étude se base sur la volonté des profils à changer de comportement.

Pour le cas de quatre clusters, nous constatons que deux profils extrêmes se dégagent. Le premier avec une intention élevée de changer de comportement, une bonne connaissance des éco-gestes et de l'usage des équipements, une attitude positive envers les éco-gestes, et des niveaux élevés de responsabilité et de conscience environnementale (*Cluster 1 ; k=4*). Le profil opposé est caractérisé par une faible intention de changer, une vision personnelle faible de la capacité de changer les comportements, et une attitude négative par rapport aux éco-gestes (*Cluster 2 ; k=4*). Ce profil est caractérisé aussi par un niveau de responsabilité faible et une grande importance donnée au confort par rapport aux consommations d'énergie. Cette classification ne nous permet cependant pas de déterminer les autres profils étant donné qu'ils ne présentent pas des caractéristiques distinctives capables de représenter un blocage ou une motivation (**Figure 63**).

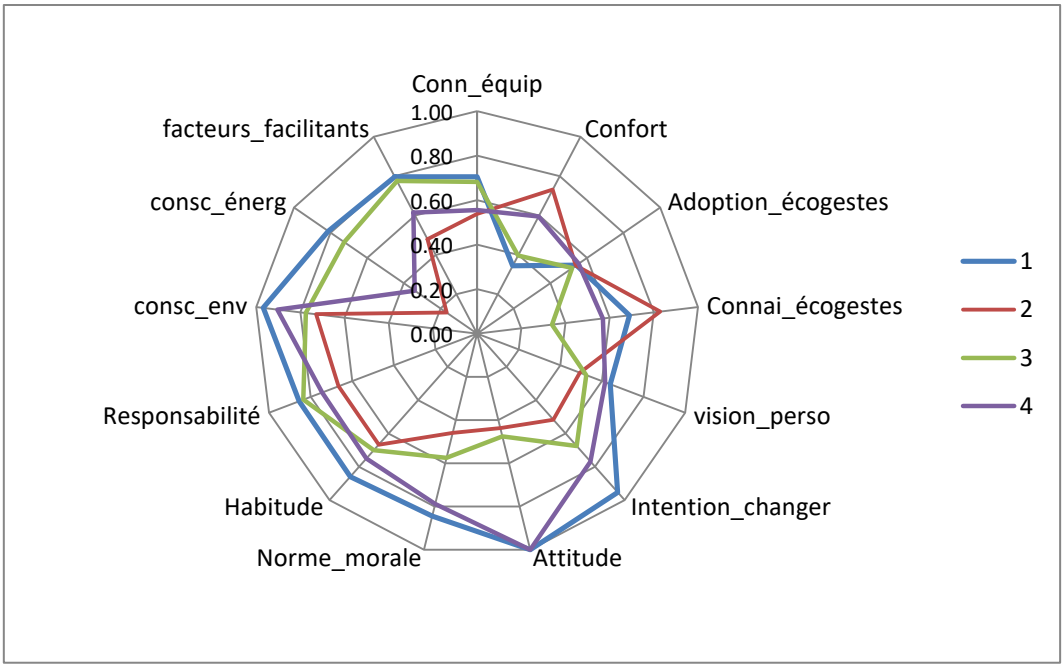


Figure 63 : Représentation graphique des clusters obtenus suivants leurs centres finaux (k=4)

En ce qui concerne la classification en cinq profils (k = 5), nous constatons des éléments caractéristiques pour certains profils par rapport à d'autres. Nous retrouvons les deux profils avec des caractéristiques minimales et maximales en termes d'intention de changer le comportement comme dans le cas de la classification en quatre profils (*Cluster 1* et *Cluster 4* ; k=5). En ce qui concerne les profils intermédiaires, nous distinguons un profil qui se caractérise par un faible niveau de responsabilité (*Cluster 2 ; k=5*), le deuxième se caractérise par l'importance qu'il accorde au confort (*Cluster 3; k=5*), et le dernier par une faible norme morale et une attitude négative envers les éco-gestes (*Cluster 5; k=5*) (**Figure 64**).

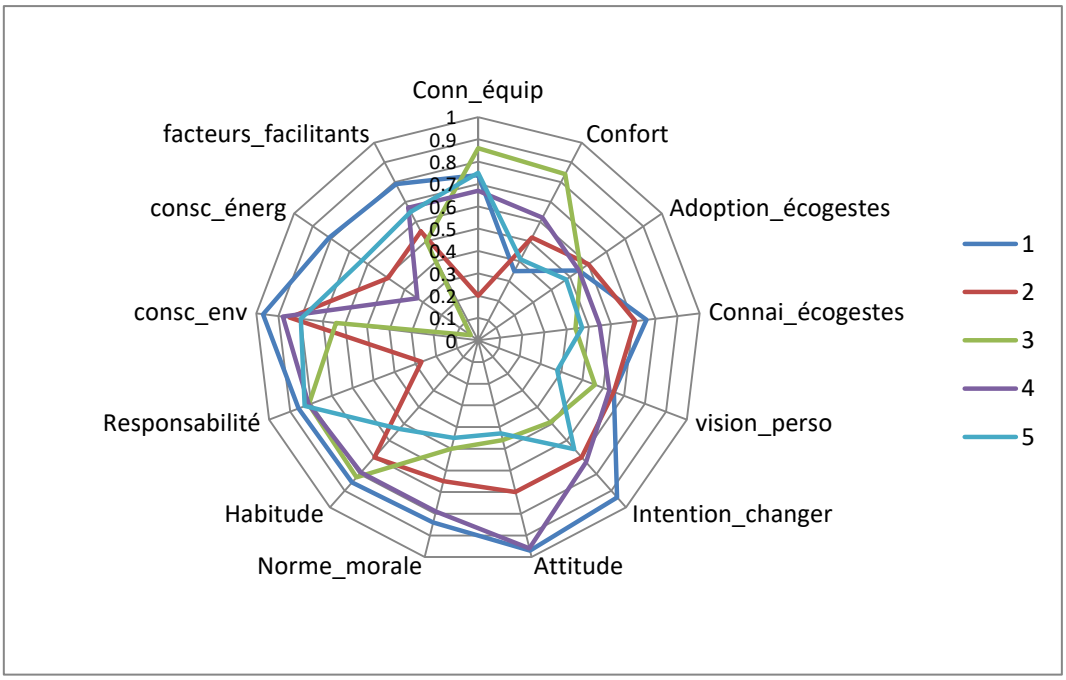


Figure 64 : Représentation graphique des clusters obtenus suivants leurs centres finaux (k=5)

Bien que les résultats du clustering soient satisfaisants et montrent une cohérence des 5 clusters, ils ne se lient pas directement aux profils que nous souhaitons générer pour leur appliquer des types d'intentions. Au regard des résultats non probants de ces deux partitionnements pour l'établissement de nos groupes, nous proposons de réduire le nombre de paramètres étudiés. Pour cela nous nous basons sur les résultats précédents afin de ne retenir que les caractéristiques clés pour définir les différents profils. Une fois les paramètres identifiés nous procéderons de nouveau à un partitionnement pour déterminer les nouveaux profils basés sur ce nombre de paramètres réduit. Enfin nous nous intéresserons à l'affectation des différents occupants à ces profils générés.

En nous basant sur le profilage précédent, nous ne retenons que les paramètres des profils qui sont les plus déterminants et affichent des différences notables entre les différents profils. Voici les paramètres retenus :

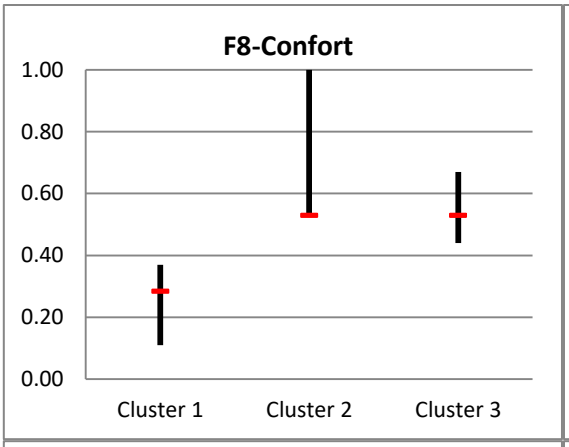
- **F1-Intention**
- **F2-Vision_perso**
- **F3-F4-Connaissance** (regroupement des paramètres **F3-Connai_équip** et **F4-Connai_écogestes)**
- **F6-Attitude**
- **F8-Confort**
- **F10-Responsabilité**
- **F12-Consc_env**

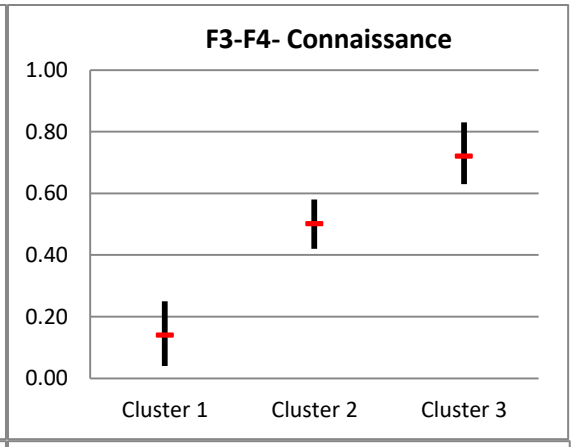
Nous nous basons sur les éléments suivants afin de justifier ce choix de réduction de nombre de facteurs :

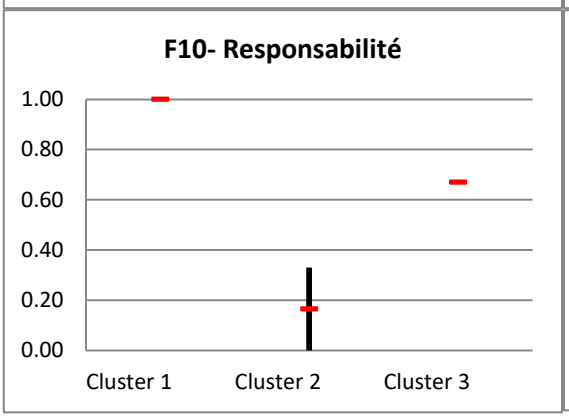
- Les paramètres sélectionnés sont parmi ceux qui présentent des corrélations significatives avec d'autres facteurs dans la matrice de corrélation. Ce sont également ceux qui permettent de mieux comprendre les comportements et les préférences des occupants en matière d'efficacité énergétique.
- Les paramètres sélectionnés ont permis de différencier les profils d'occupants et à mettre en évidence les caractéristiques clés qui les distinguent.

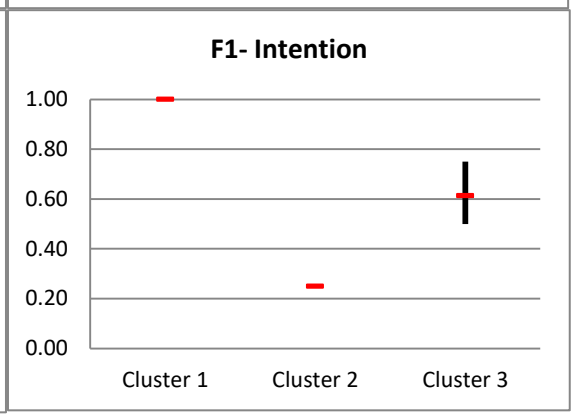
Cette réduction du nombre de paramètres nous permet de nous concentrer sur les facteurs les plus significatifs et de réduire le bruit afin de réaliser une meilleure classification des profils.

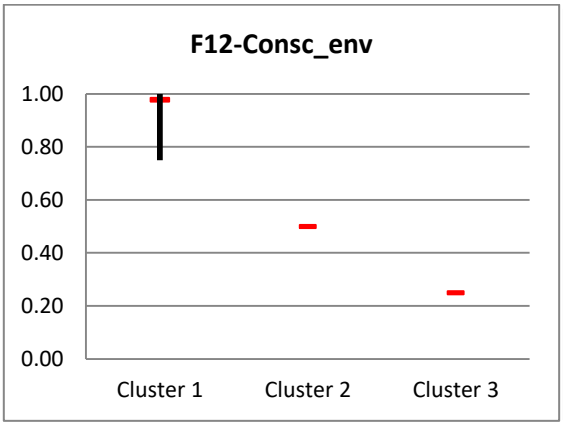
Forts de ces 7 paramètres, nous réalisons sur les résultats de notre échantillon un nouveau clustering basé sur 3 clusters afin d'identifier les profils les plus représentatifs dans chacun de ces paramètres. Les résultats sont présentés dans la Figure 65 ci-dessous :

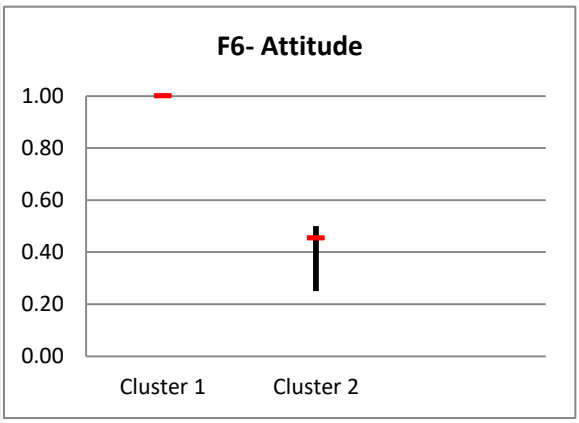

F8-Confort
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2
Cluster 3

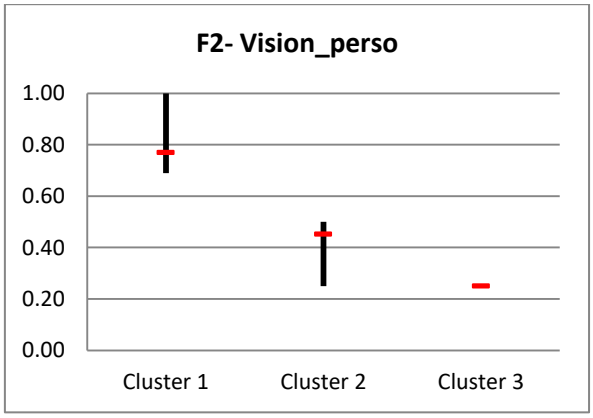

F3-F4- Connaissance
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2
Cluster 3


F10- Responsabilité
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2
Cluster 3


F1- Intention
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2
Cluster 3


F12-Consc_env
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2
Cluster 3


F6- Attitude
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2


F2- Vision_perso
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cluster 1
Cluster 2
Cluster 3

Nombre d'individus pour chaque cluster	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
F8-Confort	16	9	26
F3-F4- Connaissance	3	15	33
F10- Responsabilité	26	6	19
F1- Intention	19	2	30
F12-Consc_env	31	18	2
F6- Attitude	29	22	
F2- Vision_perso	23	26	2

Figure 65: Distribution suivant trois classes des valeurs des différents paramètres avec le nombre d'individus pour chaque classe

Afin de construire nos profils avec leurs caractéristiques propres, nous avons adopté la démarche suivante. En premier lieu, suivant les profilages que nous avons pu rencontrer dans la littérature et les réponses à notre questionnaire, nous proposons d'établir cinq profils qui permettent de distinguer l'intention d'adoption de gestes écoresponsables :

- *Profil insoucieux* : il s'agit d'occupants dont la caractéristique principale est un très faible niveau de **Responsabilité**. Même en ayant une bonne connaissance, ce profil ne possède pas une vision positive sur les actions de réduction de consommation d'énergie.
- *Profil qui favorise son confort* : Nous regroupons dans ce profil tous les occupants pour qui le paramètre **confort** est plus important que les économies d'énergie.
- *Profil qui manque de connaissances* : Pour ce type d'occupants qui disposent d'une conscience environnementale élevée, le paramètre **connaissance** est le plus faible, ce qui implique un blocage pour réduire les consommations d'énergie.
- *Profil impliqué* : ce profil est caractérisé à l'opposé du profil insoucieux par une importante **intention de changer**. Il dispose aussi d'un niveau de **Conscience environnementale** élevée et d'une vision très positive sur l'impact des éco-gestes ce qui implique un niveau **Attitude** important.

Nous avons remarqué que le paramètre **Vision personnelle** permet de différencier certains profils. La présence d'un profil intermédiaire qui ne peut être caractérisé comme les derniers et qui n'atteint pas le niveau de profil impliqué mais dont les individus ont en commun une **Vision personnelle** faible ce qui nous a amené à rajouter le profil moyen :

- *Profil moyen :* ce profil est caractérisé par une **vision personnelle** faible et avec des valeurs moyennes dans les autres caractéristiques.

Grace à ces définitions préalables, nous utilisons la méthode décrite ci-dessous afin de classifier les différents individus de cette étude et les affecter aux différents profils.

Pour chaque paramètre, nous procédons séquentiellement à partir des valeurs du clustering effectué sur les 7 paramètres retenus.

Pour le premier profil insoucieux, nous voyons qu'une valeur faible du paramètre responsabilité apparait au cluster 2. Nous pouvons donc affecter les personnes de ce cluster à ce profil. A l'itération suivant, ces personnes seront supprimées des autres clusters dans lesquels elles pouvaient apparaitre car elles appartiennent maintenant au profil insoucieux.

En procédant de façon similaire pour le profil suivant qui se base sur le paramètre confort, nous constatons que le cluster 2 présente un maximum qui montre que ces individus privilégient leur confort. Ils sont donc légitimement classés dans cette catégorie.

Nous continuons à lier chaque profil avec le cluster qui représente les valeurs soit minimales soit maximales du paramètre caractéristique tel que présenté dans les définitions de ces profils. Dans le cas où la classification retourne un profil avec un nombre d'individus < 5 % de la totalité de la population, nous ne nous contentons pas seulement du cluster avec les valeurs maximales ou minimales mais nous rajoutons le cluster avec les valeurs moyennes. Nous procédons aussi à l'élimination des autres profils en ne gardant que les clusters avec des valeurs loin des valeurs maximales ou minimales pour les paramètres qui ne sont pas caractéristiques du profil.

Une fois les affectations réalisées, nous obtenons les résultats suivants :

Nombre d'individus	Profil insoucieux	Profil qui favorise le confort	Profil qui manque de connaissances	Profil impliqué	Profil moyen	Individus non affectés
51	6	7	11	12	7	8

Afin d'affecter le reste des individus qui n'appartiennent à aucun des 5 profils suivant la classification précédente, nous utilisons une méthode couramment utilisée pour affecter les nouveaux individus à des clusters déjà existants. Cette méthode se base sur la distance euclidienne entre les valeurs des paramètres de cet individu et les centres finaux des clusters. En mesurant la proximité entre l'individu et les centres finaux, nous pouvons déterminer à quel cluster il est le plus similaire. Cette méthode est largement utilisée et acceptée dans les domaines de l'apprentissage automatique et de l'analyse de données (Iglesias and Kastner, 2013).
Dans notre cas, et suite à la méthode itérative utilisée précédemment, nous ne disposons pas des clusters finaux de chaque profil. Nous devons donc les calculer à partir des valeurs des paramètres des individus qui leur ont été affectés.

Nous résumons dans ce qui suit l'ensemble des étapes de la méthodologie adoptée pour affecter les 8 individus restants :

1)- Nous recalculons à partir de cette classification les valeurs moyennes pour chaque profil suivant les individus qui lui ont été affectées et ce pour chaque paramètre. Ces valeurs peuvent être considérées comme les nouveaux centres de classification. La Figure 66 résume les résultats d'une telle classification et affiche les différences entre les profils en ce qui concerne tous les paramètres.

2)- Nous calculons la distance euclidienne entre les paramètres des individus non affectés et les nouveaux centres calculés.

3)- Nous assignons chaque individu au profil pour lequel il a le minimum de moyennes de distances par rapport à l'ensemble des paramètres pris en compte.

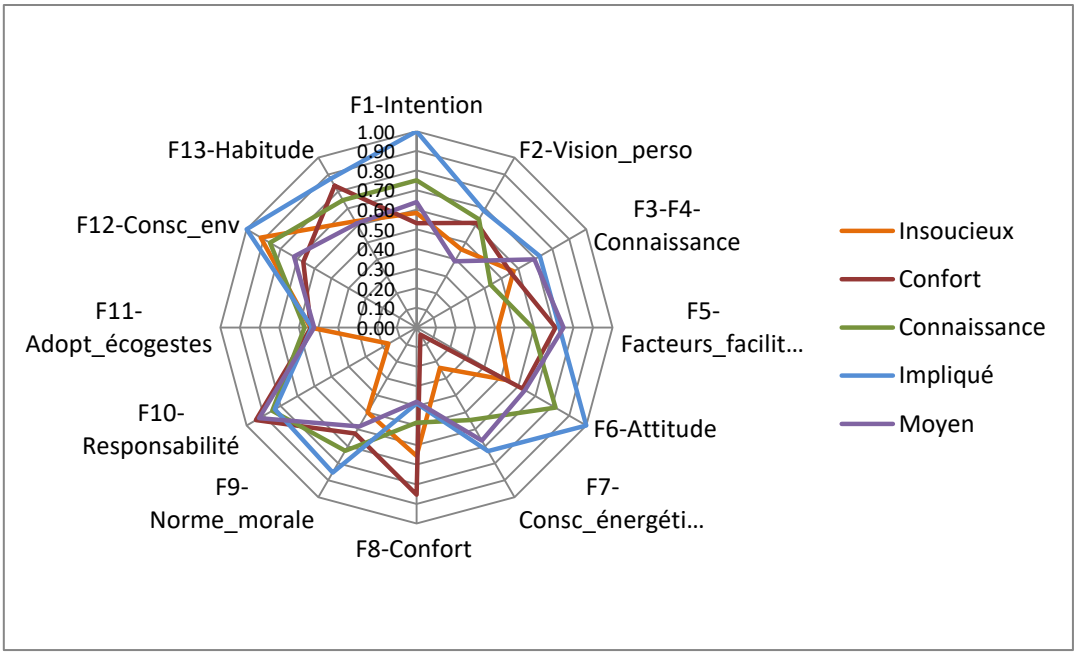


Figure 66: Paramètres des 5 profils crées

Après avoir assigné la totalité des individus aux cinq profils déterminés, dans la partie suivante, nous nous concentrons sur les hypothèses à faire concernant les nudges que nous proposons d'appliquer pour chaque profil suivant ses caractéristiques.

2.2 *Hypothèses des incitations – Choix des Nudges*

Nous reprenons, dans le cadre de notre étude, les nudges classés dans le **: Classification des nudges liés à l'énergie dans la littérature avec des exemples de travauxTableau 8** de la partie 7.2.2 du chapitre II. Ci-dessous un bref rappel de ces nudges :

- *Nudges d'information :* ces nudges ont pour objectif de procurer des informations aux occupants concernant les éco-gestes à effectuer et leurs conséquences :
    - Rappels d'éco-gestes
    - Tips pour réduire les consommations d'énergie
    - Nudges cognitifs : Informations concernant l'impact des éco-gestes sur la consommation d'énergie dans le bâtiment suivant la perception de chaque occupant : financier, environnemental, énergétique et autres
- *Nudges de rétroaction :* nous procurons aux différents participants un feedback et un monitoring sur l'évolution de leurs consommations quotidiennes et hebdomadaires.
- *Nudges de support social :* ces nudges se présentent sous la forme d'encouragements adressés aux occupants et des messages personnalisés.
- *Nudges de norme sociale injonctive :* dans le cas de ce nudge, nous envoyons aux participants des messages qui renforcent l'idée générale et collective des éco-gestes comme un comportement commun apprécié par l'ensemble de l'entourage.
- *Nudges de rétroaction comparative (Norme descriptive) :* Il s'agit dans ce cas de feedback social dans lequel nous envoyons un suivi quotidien et hebdomadaire des consommations d'énergie de chaque participant avec d'autres participants. Une comparaison des consommations est envoyée aux participants.
- *Nudges de norme morale :* ce type de nudges s'adresse à la norme morale du participant en lui montrant l'impact de ses comportements sur la planète, l'environnement et les autres créatures. Nous les présentons dans le cadre de notre étude sous la forme de

nudges affectifs.

À partir de cette classification de nudges, nous proposons pour les 5 profils que nous avons définis précédemment et selon leurs différentes caractéristiques les incitations suivantes :

1. *Profil impliqué* : ce profil possède les caractéristiques suivantes :
   - Très bien informé
   - Bon niveau d'éco-gestes
   - Intention élevée de changer de comportement
   - Attitude très positive sur les éco-gestes
   - Norme morale très élevée
   - Les éco-gestes font partie de ses habitudes
   - Niveau de conscience de responsabilité élevé
   - Conscience environnementale élevée
   - Convaincu de la présence de conditions facilitants l'adoption des éco-gestes
   - Faible niveau de blocages surtout liés à l'oubli

En nous basant sur ces caractéristiques, nous faisons l'hypothèse que ce profil nécessite des nudges de renforcement qui permettent de renforcer ses convictions et ses actions et permettent de les faire évoluer. Ces nudges peuvent se présenter sous la forme d'informations et des rappels d'éco-gestes. Les nudges à appliquer sont les suivants :

- Nudges d'information : Rappels et informations
- Nudges cognitifs
- Nudges de support social : Encouragements et reconnaissance

2. *Profil moyen :* ce profil possède les caractéristiques suivantes :
   - Très bien informé
   - Adoption moyenne des éco-gestes
   - Vision faible de la capacité d'effectuer des éco-gestes
   - Bonne intention de changer les comportements
   - Un niveau de responsabilité élevé
   - Bonne conscience environnementale
   - Niveau de blocages moyen

En nous basant sur ces caractéristiques, nous faisons l'hypothèse que ce profil nécessite les incitations à influence sociale comme l'image sociale ou la compétition. On peut se baser aussi sur les encouragements afin d'améliorer l'image personnelle des participants. Les nudges proposés pour ce profil sont :

- Nudges de norme morale : Nudges affectifs à travers des Stickers
- Nudges de support social : Encouragements et reconnaissance pour dépasser la vision personnelle faible
- Nudges de rétroaction comparative (Norme descriptive) : sous forme de Nudge de compétition / ou Nudge de norme sociale injonctive. Le choix se fait suivant chaque individu pour booster le changement de comportement

3. *Profil qui manque de connaissances :* ce profil possède les caractéristiques suivantes :
   - Mal informé sur l'importance des nudges et leur impact
   - Niveau moyen d'adoption d'éco-gestes
   - Vision positive sur sa capacité à effectuer des éco-gestes
   - Intention élevée de changer de comportements
   - Attitude positive envers les éco-gestes

- Norme morale élevée
- Présence de blocages liés à la paresse et l'oubli

En nous basant sur ces caractéristiques, nous faisons l'hypothèse que ce profil nécessite les incitations suivantes :

- Nudges cognitifs avec des informations ciblées
- Nudges cognitifs avec des rappels d'éco-gestes
- Nudges de rétroaction / ou Nudges de support social/ ou Nudges de norme sociale injonctive/ ou Nudges de rétroaction comparative. Le choix se fait suivant chaque individu

4. *Profil qui favorise le confort :* ce profil possède les caractéristiques suivantes :
   - Bien informé
   - Grande importance du confort
   - Niveau d'adoption des éco-gestes moyen
   - Vision personnelle moyenne sur la possibilité d'effectuer des éco-gestes
   - Intention faible de changement de comportement
   - Présence de blocages liés à la perte de temps et l'inconfort

En se basant sur ces caractéristiques, nous faisons l'hypothèse que ce profil nécessite des nudges de confrontation sous forme de rappels des conséquences de ses actions. Ces conséquences sont liées à la vision du répondant sur l'usage de l'énergie : financier, environnemental, consommations d'énergie que nous collectons depuis les réponses du questionnaire. Les nudges à utiliser pour ce profil sont donc :

- Nudges d'information : rappels à travers des Stickers
- Nudges de rétroaction / ou Nudges de support social/ ou Nudges de norme sociale injonctive/ ou Nudges de rétroaction comparative. Le choix se fait suivant chaque individu pour booster son changement de comportement

5. *Profil insoucieux :* ce profil possède les caractéristiques suivantes :
   - Bien informé
   - Faible vision personnelle
   - Faible intention de changer de comportement
   - Faible norme morale
   - Niveau de responsabilité
   - Faible attitude envers les éco-gestes

En se basant sur ces caractéristiques, nous faisons l'hypothèse que ce profil nécessite à la fois des nudges de renforcement et de confrontation afin de contourner ses blocages en commençant par des stickers pour rappeler les éco-gestes et les conséquences de ses actions et ensuite en suscitant l'encouragement, la compétition ou la norme sociale chez le l'individu suivant ses réponses au le questionnaire.
Dans ce cas les incitations sont les suivantes :

- Nudges cognitifs avec des informations ciblées orientées suivant les motivations de l'individu
- Nudges de support social : Encouragements pour dépasser la norme morale faible.
- Nudges de rétroaction / ou Nudges de support social/ ou Nudges de norme sociale injonctive/ ou Nudges de rétroaction comparative. Le choix se fait suivant chaque individu pour booster son changement de comportement

Le **Tableau 37** ci-dessous résume l'ensemble des nudges utilisés dans le cadre de notre étude suivant les différents profils.

Profil	**Type de nudges utilisés**			
Profil impliqué	Nudges cognitifs : selon l'individu et ses réponses, information liée au coût, à l'impact environnemental, ou à la consommation d'énergie	Rappels : Stickers	Feedback et reconnaissance	Nudges suivant les réponses
Profil moyen	Nudges affectifs : Appel moral	Rappel : Stickers	Feedback et reconnaissance	Nudges suivant les réponses
Profil qui manque de connaissances	Nudges cognitifs : selon l'individu et ses réponses, information liée au coût, à l'impact environnemental, ou à la consommation d'énergie	Rappel : Stickers	Nudges suivant les réponses	Nudges suivant les réponses
Profil qui favorise le confort	Nudges affectifs : Appel moral	Rappel : Stickers	Nudges suivant les réponses	Nudges suivant les réponses
Profil insoucieux	Nudges cognitifs : selon l'individu et ses réponses, information liée au coût, à l'impact environnemental, ou à la consommation d'énergie	Rappels : Stickers	Feedback et reconnaissance	Nudges suivant les réponses

Tableau 37 : Liste des nudges à appliquer suivant les différents profils

Afin de vérifier la concordance entre ces hypothèses de nudges à appliquer et les choix et préférences des individus, nous comparons ces hypothèses avec les paramètres nudges établis au début de l'étude. En effet, nous avons annoncé préalablement que les paramètres **N1-Compétition, N2-Reconnaissance, N3-Norme_sociale** seront utilisés pour déterminer les nudges adéquats à affecter aux occupants (Tableau 35). Nous nous baserons aussi sur le paramètre **F9-Norme_morale** vu qu'il est aussi lié au nudge d'appel moral. Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans la détermination du type de nudge qui est le plus efficace pour influencer les occupants. Nous représentons dans la **Figure 67** les valeurs de ces paramètres pour chaque profil. Cela nous permet de déterminer l'influence relative de chaque paramètre sur le comportement des occupants et donc s'assurer que les nudges choisis dans le **Tableau 37** correspondent aux préférences des occupants.

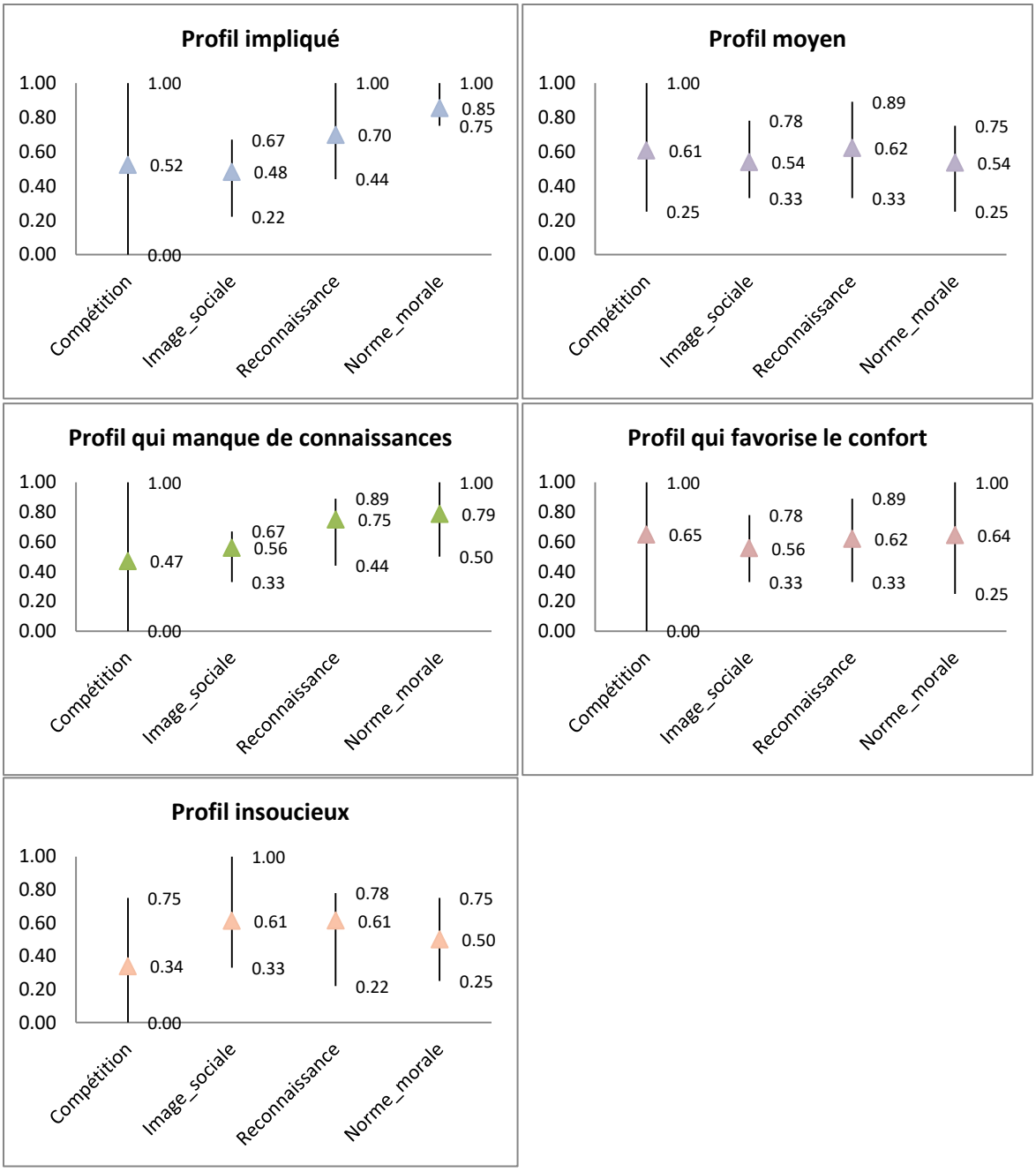


Figure 67 : Distribution des valeurs des paramètres liés au nudges pour chaque profil

En analysant ces graphes, nous remarquons une concordance entre les hypothèses que nous avons émises et les réponses des occupants. Le profil impliqué par exemple présente des valeurs élevées pour les paramètres **N2-Reconnaissance** et **F9-Norme_morale**. Ceci correspond au nudges que nous avons proposé pour ce profil à partir de sa description. Nous retrouvons certaines concordances pour les autres profils, mais les valeurs obtenues pour les différents paramètres sont proches et l'intervalle est assez large.

Une fois les profils des occupants définis et les hypothèses des nudges à utiliser présentées, nous nous intéressons dans ce qui suit au processus expérimental mis en place afin de tester l'efficacité des nudges sur les différents profils et leur impact sur la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment. Cela fera l'objet de la partie suivante.

3 *Processus expérimental*

L'expérimentation est effectuée sur une période totale de 12 semaines (90 jours) qui est constituée de 3 phases :

Phase pré-nudges	3 semaines	Aucun nudge n'est appliqué
Phase expérimentale des nudges	6 semaines	Les nudges sont appliqués sur les participants
Phase post-nudges	3 semaines	Les nudges sont arrêtés

Un total de dix personnes a participé à l'expérimentation sous les conditions expérimentales suivantes afin d'assurer la crédibilité des résultats :

- Présence d'un groupe test auquel on n'applique aucun nudge.
- Le hasard dans le choix des participants dans l'expérimentation.
- Méthodologie du double aveugle : ni les participants, ni les expérimentateurs ne doivent savoir à quel groupe appartiennent les différents participants afin de ne pas influencer le cours de l'expérimentation suivant ses attentes (Chammat et al., 2019).

Nous prenons aussi en considération la démarche à adopter pour établir une démarche de changement de comportement proposée par (Grilli and Curtis, 2019).

Les participants appartiennent aux profils suivants :

Profil impliqué	Profil moyen	Profil insoucieux	Profil orienté confort	Profil manque de connaissance	Cas test
1	3	1	3	1	2

Dans l'expérimentation, deux personnes participantes n'ont reçu aucun nudge et représentent par conséquent le cas test.

Pour chaque profil nous affectons les nudges correspondants tels que décrits précédemment. Si nécessaire, nous nous basons sur les paramètres suivants pour déterminer le nudge supplémentaire à appliquer pour chaque profil :

- **Norme morale élevée :** Nous appliquons le nudge de norme morale
- **Image sociale élevée :** Nous appliquons le nudge de norme sociale injonctive
- **Reconnaissance élevée :** Nous appliquons le nudge de rétroaction personnelle ou le nudge d'encouragements ou les deux
- **Esprit de compétition élevée :** Nous appliquons le nudge de rétroaction comparative

Dans les deux dernières parties du questionnaire : « *Partie IV : L'énergie et vous »* et « *Partie V : Vos intentions VS vos actions »*, nous avons posé aux occupants des questions sur le format qu'ils privilégient si une campagne de sensibilisation aux écogestes est mise en place dans le bâtiment. Des questions sur le support de communication, le type de message et son contenu ont été posé aux occupants. (Exemple : *Quel format pour vous est le plus facile à manipuler ? Des graphes visuels, Des valeurs numériques, Des images expressives, Des mots et des explications*).

Les réponses à ces questions nous permettent de vérifier la concordance entre les hypothèses de nudges que nous avons établis précédemment pour chaque profil et les choix et préférences des individus appartenant à ce même profil.

Dans le **Tableau** 38, nous résumons l'ensemble des nudges que nous avons appliqué aux différents participants tout en les comparant avec les propositions d'incitations exprimées par les différents participants. Nous remarquons une bonne concordance entre les incitations demandées par les occupants et les propositions théoriques de nudges que nous avons mis en place.

Profil	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Semaine 5	Semaine 6	Incitations proposées par le participant
Insoucieux	Informations cognitives sur l'impact carbone des consommations	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Feedback avec préconisations des éco-gestes à effectuer	Feedback avec encouragements en cas de réduction des consommations	Feedback avec nudge de l'image sociale	Image sociale	- Informations sur l'impact des comportements - Suivi des consommations du participant - Graphes visuels
Favorise le confort 1	Stickers avec norme morale	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	- Des graphes - Des valeurs numériques - Des mots et des explications - Informations sur les éco-gestes à adopter - Rappels sous forme d'étiquettes
Favorise le confort 2	Stickers avec norme morale	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison + Norme morale	- Consommations des autres occupants - Graphes visuels - Valeurs numériques - Rappels sur les éco-gestes à effectuer
Favorise le confort 3	Stickers avec norme morale	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison + Image sociale	Nudges de comparaison + image sociale	- Comparaison avec d'autres bureau - Graphes visuels - Rappels réguliers
Moyen 1	Stickers avec norme morale	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Feedback et reconnaissance	Feedback et reconnaissance	Feedback + Appel moral	Feedback + Appel moral	- Suivi des consommations du participant - Graphes visuels - Valeurs numériques - Feedback - Reconnaissance
Moyen 2	Stickers avec norme morale	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Feedback et reconnaissance	Feedback et reconnaissance	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	- Informations sur les consommations du participant - Informations sur les consommations des autres participants - Graphes et valeurs numériques - Informations sur les éco-gestes avec des rappels réguliers

Moyen 3	Stickers avec norme morale	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Feedback et reconnaissance	Feedback et reconnaissance	Feedback avec nudge de l'image sociale	Image sociale	- Graphes, valeurs numériques, images expressives, mots et explications - Informations sur les éco-gestes à effectuer - Informations sur l'impact environnemental des actions des occupants - Rappels réguliers sur les éco-gestes à effectuer
Manque de connaissances	Informations cognitives sur l'impact carbone des consommations d'énergie	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Nudges de comparaison	Nudges de comparaison	Feedback et reconnaissance	Feedback et reconnaissance	- Informations du bureau en comparaison avec d'autres bureaux - Graphes visuels - Consommations de chacun - Informations sur l'impact environnemental - Remerciements
Impliqué	Informations cognitives sur l'impact carbone des consommations d'énergie	Stickers avec éco-gestes à appliquer collés dans le bureau et envoyés par mail	Feedback et reconnaissance	Feedback et reconnaissance	Feedback avec nudge de norme morale	Norme morale	- Informations sur les consommations du bureau - Graphes visuels - Valeurs numériques - Rappel sur les éco-gestes - Impact environnemental - Remerciements

Tableau 38 **: Résumé des nudges appliqués aux différents participants**

Maintenant que nous avons présenté les types de nudges proposés pour chaque occupant dans le cadre de l'expérimentation, nous présentons dans ce qui suit un rappel des écogestes demandés aux occupants dans le cadre de l'expérimentation.

4 *Ecogestes encouragés*

La première phase de nudges qui se présente sous forme de phase informative ou de rappel pour tous les participants mais avec une adaptation suivant le type de profil : Rappels, informations, stickers a pour but de communiquer aux occupants les écogestes à adopter dans le bureau et que nous souhaitons encourager à travers notre étude. Nous nous basons pour cela sur les écogestes préalablement étudiés dans la partie 5.1.2 du chapitre III. Dans le tableau ci-dessous, un récapitulatif des écogestes rappelés aux occupants au début de l'expérimentation et que nous souhaitons atteindre.

Usage	Ecogestes
Ordinateur	Pense à activer le mode économie d'énergie sur ton ordinateur. Pense à mettre en veille ton ordinateur quand tu prends une pause. Pense à éteindre ton ordinateur en quittant le bureau, quand cela est possible pour toi, sinon tu pourrais te contenter du mode veille.
Écran	Pense à éteindre ton écran à chaque fois tu fais une pause. Pense aussi à le débrancher en fin de journée.
Éclairage	Pense à favoriser l'éclairage naturel : Ouvre les stores pour profiter au maximum de la lumière !!! Pense à éteindre les lumières à chaque fois que tu quittes ton bureau.
Chauffage	Le basculement en mode inoccupé dans le bâtiment commence à 19h. On peut donc éviter quelques heures de chauffage inutiles entre le moment de quitter le bureau et 19h. De plus, des fois dans le bâtiment, le système ne bascule pas en mode inoccupé et le chauffage continue de fonctionner avec la même consigne même la nuit !! Donc …. En quittant le bureau, 1. Pense à réduire la consigne de chauffage sur le boîtier au minimum (correspond à 16 °C). Il est préférable de le faire une heure avant de quitter le bureau. 2. Pense à basculer la vitesse du ventilateur à Auto afin de réguler la température en cas de besoin la nuit. 3. Ferme les stores, les fenêtres, et la porte pour éviter les déperditions de chaleur la nuit. Au cours de la journée, 1. Commence par ouvrir les stores pour profiter de la chaleur provenant du soleil. 2. Choisis la consigne du milieu ou un peu plus bas si tu peux (21°C maximum). 3. Pense à mettre des vêtements chauds avant d'augmenter le chauffage. 4. Maintiens la porte et les fenêtres fermées afin d'éviter les déperditions de chauffage. 5. Pense à éteindre le système avant d'ouvrir la fenêtre
Autres équipements	1. Pense à éteindre et débrancher tous les équipements électriques en cas de non-usage (machine à café, bouilloire, autre, …) 2. Réchauffer la quantité d'eau nécessaire seulement avec la bouilloire

Tableau 39 : Récapiltulatif des écogestes rappelés aux occupants en début d'expérimentation

Nous avons adapté les messages envoyés aux occupants au fur et à mesure de leur évolution dans l'expérimentation en les encourageant pour les écogestes qu'ils sont parvenus à faire et en leur rappelant ceux sur lesquels certains efforts sont encore à faire. Le suivi des écogestes s'effectue à travers une comparaison entre les consommations théoriques en cas d'adoption de l'écogeste par l'occupant et ses consommations réelles.
L'Annexe 2 présente deux exemples différents de la façon avec laquelle nous avons envoyé ces rappels aux participants suivant leurs profils.
Notre étude s'intéressant à l'intégration d'un volet technologique dans l'implication des occupants dans une démarche de gestion des consommations d'énergie dans le bâtiment, il est important de penser au moyen de communication à utiliser afin de faire parvenir les nudges aux participants. La partie suivante présente l'outil de communication développé afin de partager les nudges avec les participants.

5 *Moyen de communication avec les occupants*

L'envoi des nudges a été effectué à travers une plateforme (**Figure 68**). Le choix de l'utilisation d'une plateforme permettant d'envoyer des e-mails aux participants s'est basé sur la volonté de faciliter la communication mais aussi du constat établi par les travaux de (Kamilaris et al., 2015) qui stipulent que les e-mails représentent un canal de communication plus adéquat que les posters ou les brochures. Par ailleurs, notre étude se base aussi sur l'investigation de l'utilisation de stickers collés dans les bureaux des participants.

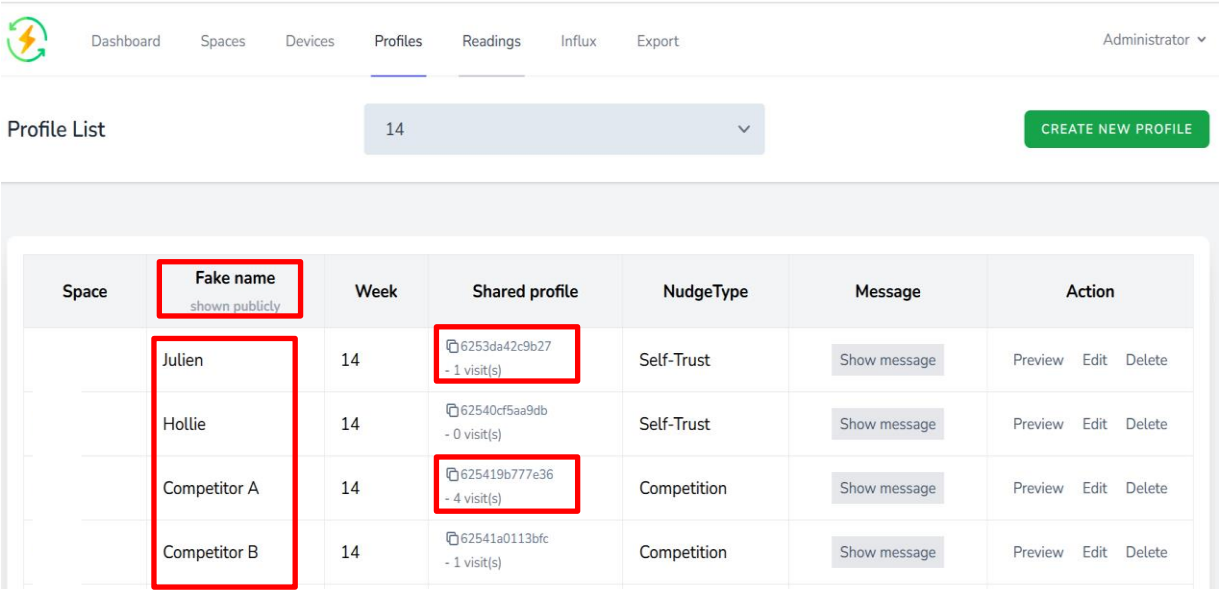


Figure 68: Interface Kilowatt pour l'envoi des nudges aux participants

La plateforme utilisée permet de :

- Affecter des noms anonymes aux différents profils afin d'assurer le critère du double aveugle (**Figure 68**)
- Afficher le monitoring des consommations des participants en se basant sur les données des capteurs : consommation totale et consommations de chaque poste (**Figure 69**)
- Envoyer des messages personnalisés à chaque participant (**Figure 69**)

- Afficher des graphes de comparaison des consommations du participant avec d'autres participants ainsi qu'un podium pour les gagnants (**Figure 69**)
- Afficher au gestionnaire de la plateforme le nombre de visites effectuées pour chaque participant (**Figure 68**)

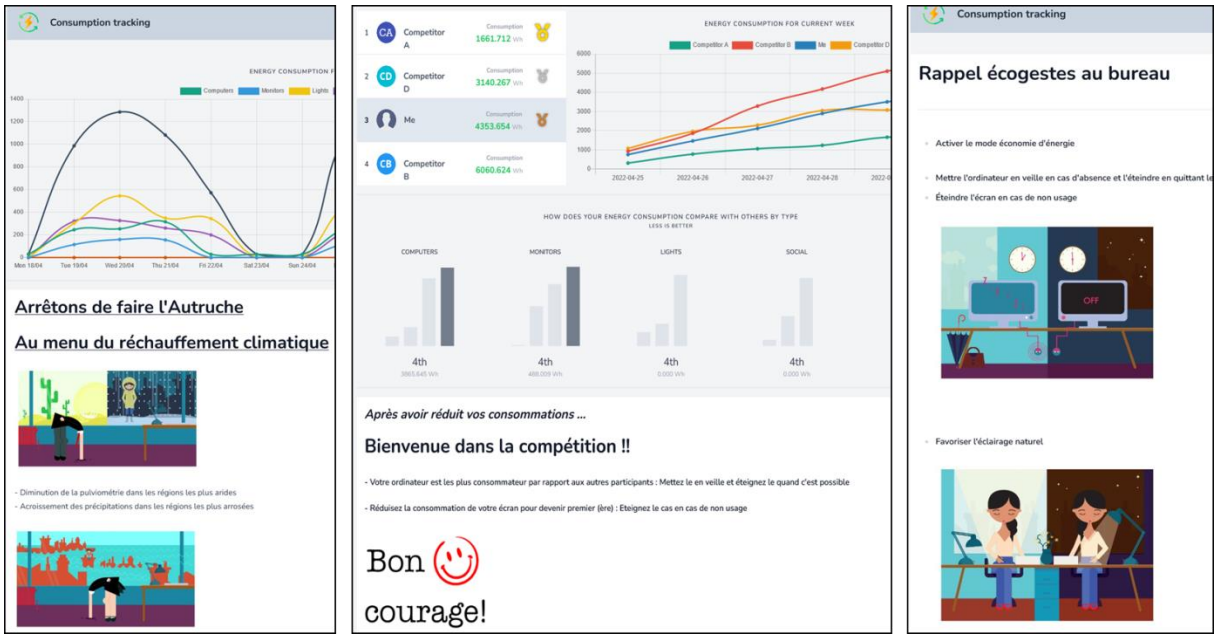


Figure 69: Exemple de messages envoyés aux occupants : suivi de consommations, compétition, rappels éco-gestes

Les stickers utilisés dans notre expérimentation proviennent des travaux de (Charlier et al., 2018).

Ceux concernant des rappels d'éco-gestes ont été collés à côté du poste de consommation concerné. Ci-dessous des exemples de stickers utilisés (**Figure 70**).

Figure 70 : Stickers avec des rappels des éco-gestes à effectuer lors de l'usage des différents systèmes du bâtiment, (Charlier et al., 2018)

Ceux concernant un appel moral ont aussi été collés à côté des postes de consommations concernés. La (**Figure 71**) présente des exemples des stickers utilisés.

Figure 71 : Stickers avec des images rappelant l'impact des consommations d'énergie sur le changement climatique (Charlier et al., 2018)

6 *Résultats*

6.1 *Impact de l'utilisation des nudges sur la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment sujet de l'étude*

Nous rappelons que les postes concernés par notre étude sont : le poste de chauffage, de climatisation, d'éclairage et d'équipements électriques. Vu que l'expérimentation a été conduite pendant une période de chauffe, nous nous intéresserons au poste de chauffage tout seul.

En ce qui concerne le poste de chauffage, nous n'avons pas accès aux consommations de chaque bureau à travers la GTB. Cependant, nous disposons des consignes de températures dans chaque bureau. Ceci nous permet de savoir si les occupants ont réduit leurs consignes de chauffage durant la période de nudges ou pas. Nous disposons aussi de l'historique des ouvertures de fenêtres. Nous l'utilisons pour l'analyse de l'écogeste lié à l'ouverture des fenêtres durant le fonctionnement du système de chauffage. L'analyse de ces écogestes se fait dans la partie qui va suivre 6.3.
Pour le moment, nous nous intéressons à la consommation totale de chauffage du bâtiment représentée dans la Figure 72 ci-dessous. La période de nudges est délimitée par les deux traits rouges.

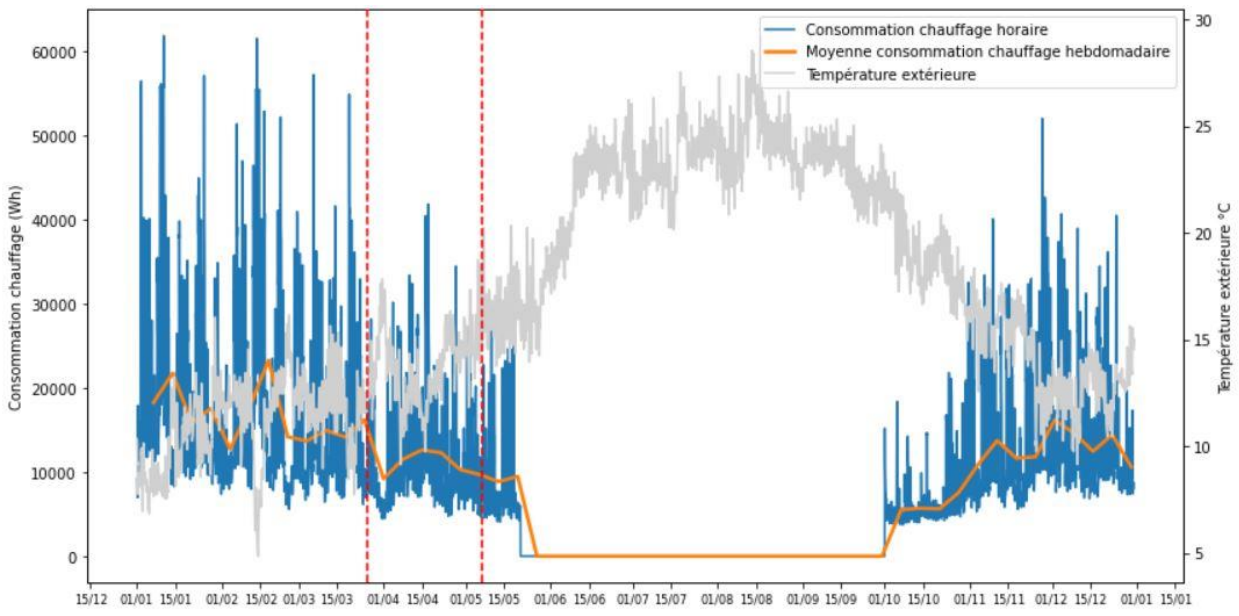


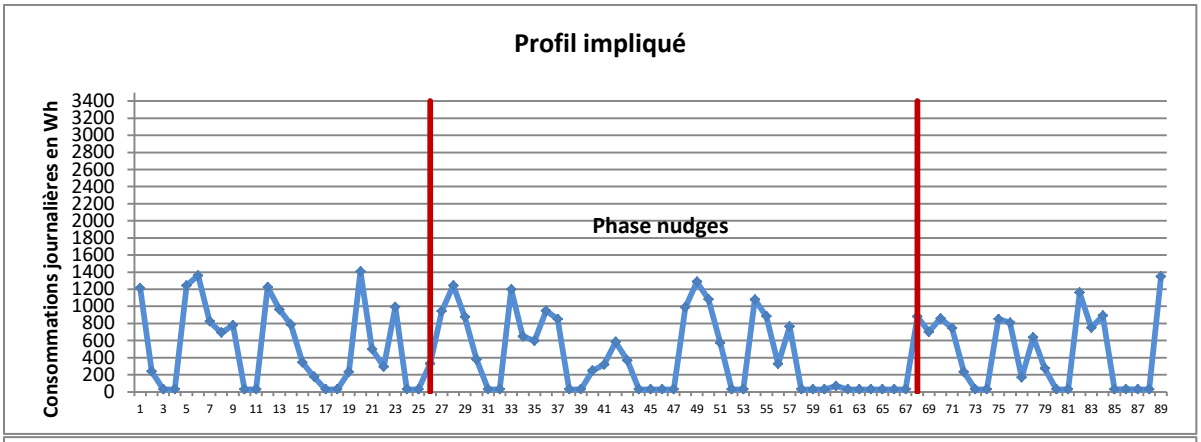
Figure 72 : Consommation totale de chauffage du bâtiment en Wh

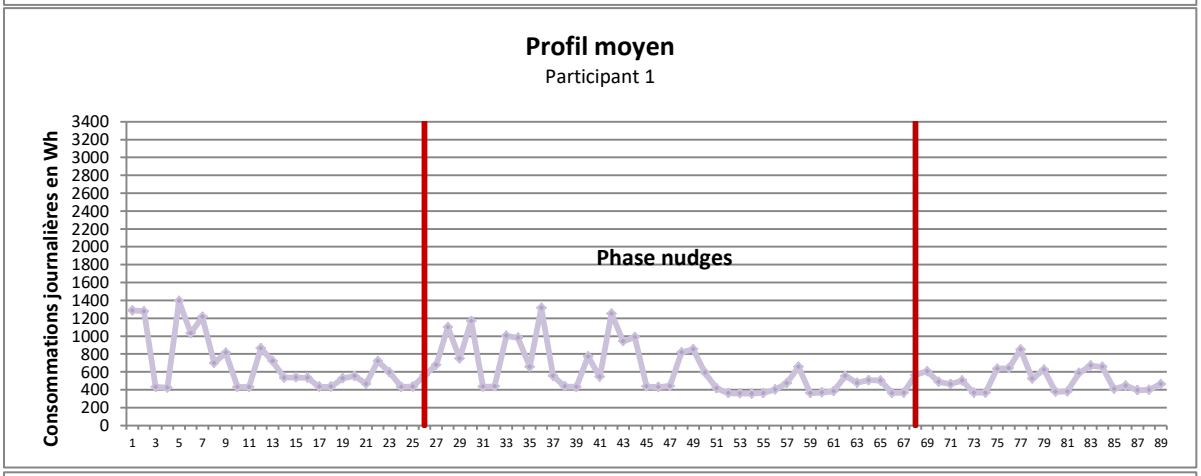
Nous constatons des réductions de consommations de chauffage durant la période des nudges. Cependant nous ne pouvons pas attester que cela est dû à l'impact des nudges. D'abord, en raison du fait que le nombre de bureaux participant à l'expérimentation n'est que de 11, nous ne pouvons pas conclure que ces réductions de consommations sont le fruit du changement de comportement de leurs occupants. Ensuite, la période des nudges se rapprochant de la période d'arrêt du système de chauffage par le gestionnaire du bâtiment, la réduction des consommations peut également être due aux températures plus élevées durant cette période de l'année, ce qui induit une réduction des consignes de chauffage. Pour cela, nous avons représenté les températures extérieures tout au long de l'année. Nous ne pouvons pas à ce stade lier les réductions de consommations de chauffage à l'application des nudges dans les bureaux. Nous analysons ce volet à travers l'adoption des écogestes et le suivi des consignes de températures dans la partie 6.3.

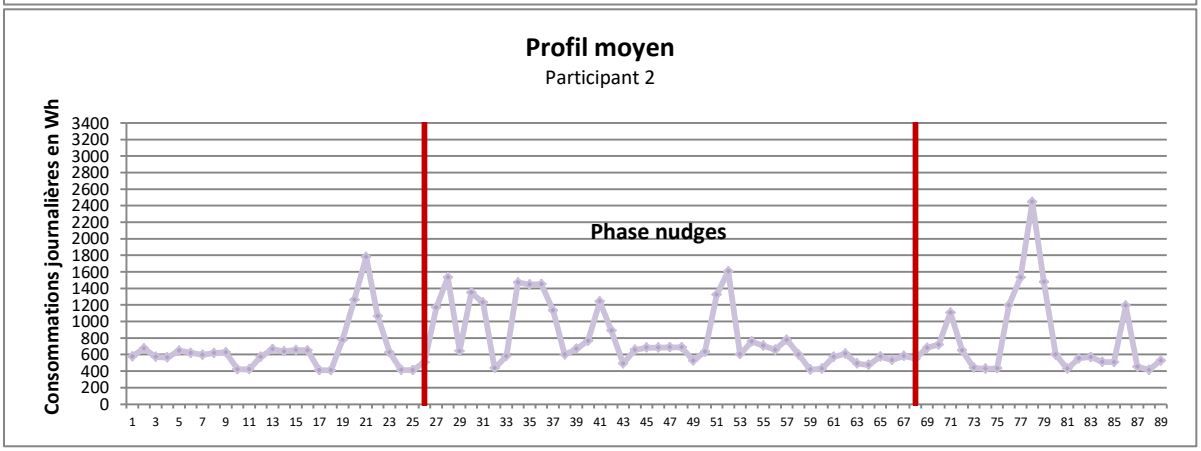
Pour les équipements électriques et le poste d'éclairage, nous collectons les données de consommation des cinq profils tout au long de la durée de l'expérimentation. Une telle évolution nous permet de comparer les consommations avant l'installation des mesures de nudges, les consommations tout au long de l'application des nudges, et les consommations après la suppression des nudges pour étudier l'impact sur le long terme. Les figures ci-dessous présentent les consommations quotidiennes des différents profils durant toute la durée de l'expérimentation. Ces consommations concernent seulement les équipements utilisés au sein du bâtiment en plus de l'éclairage :

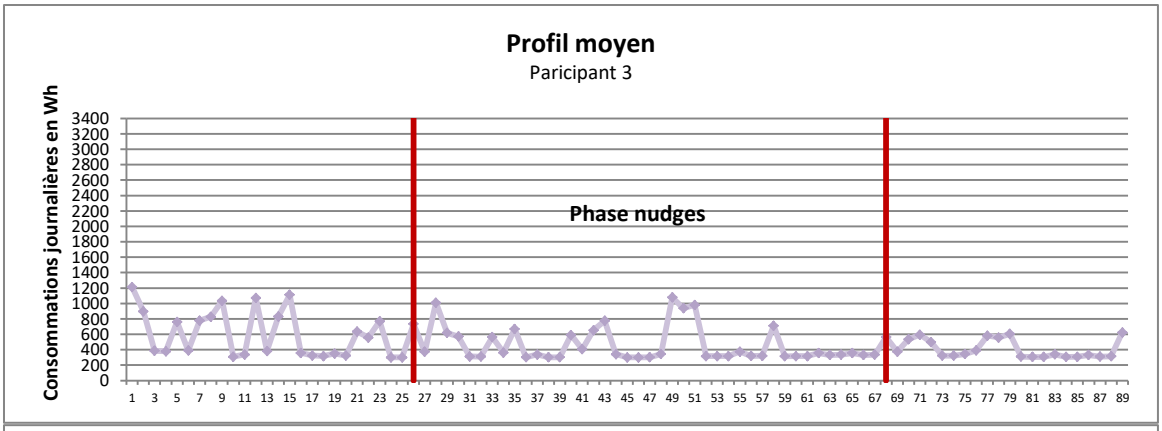
- Ordinateur
- Écran
- Bouilloire
- Machine à café
- Éclairage

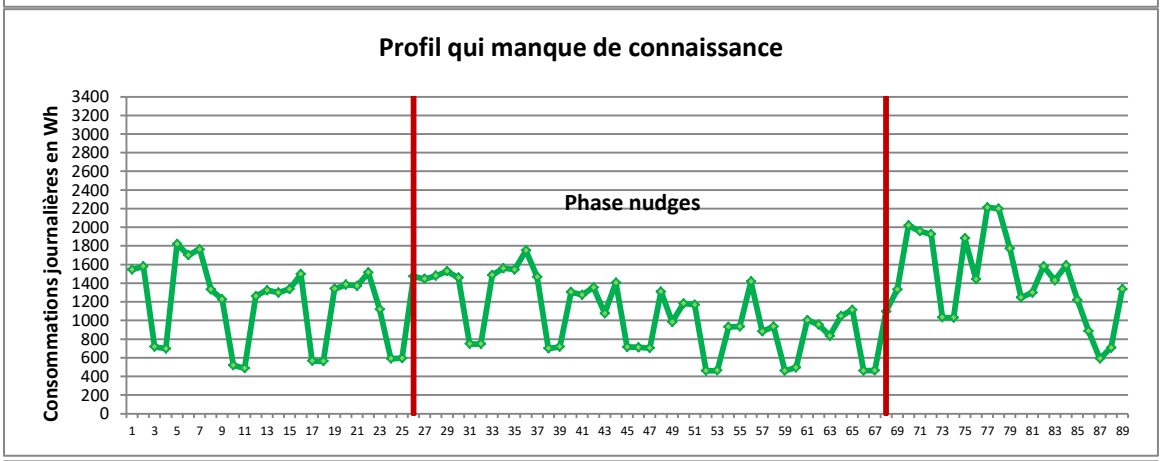
Dans les graphes ci-dessous, nous exposons les consommations totales de chaque profil durant toute la durée de l'expérimentation. La première partie du graphe représente la période avant les nudges, la deuxième représente la période d'application des nudges, et la dernière la période après la fin de l'application des nudges.

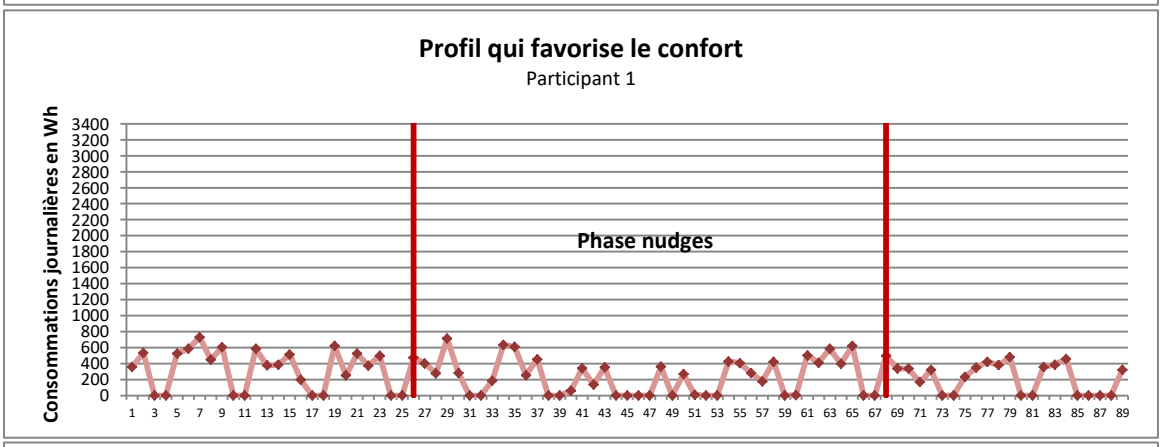


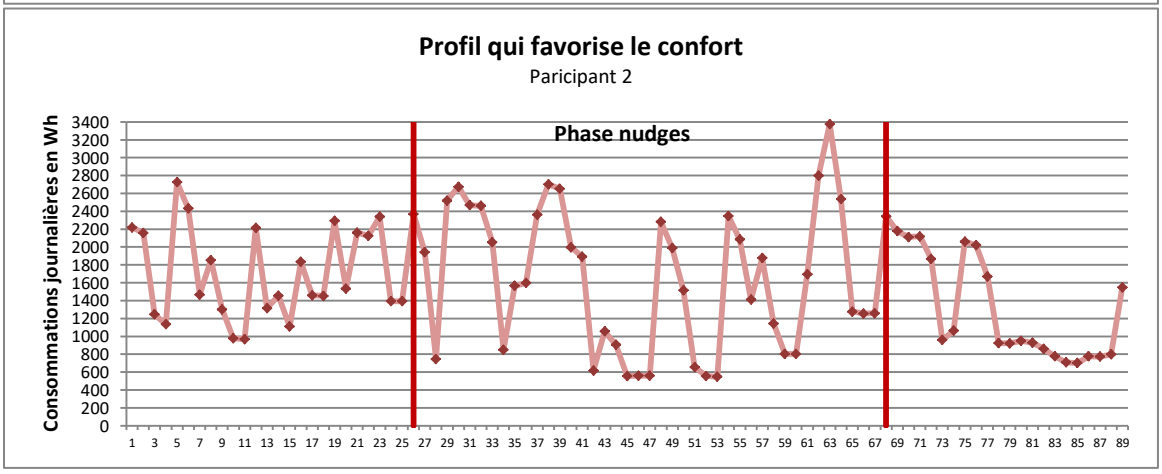





Profil moyen
Paricipant 3
Consommations journalières en Wh
Phase nudges


Profil qui manque de connaissance
Consommations journalières en Wh
Phase nudges


Profil qui favorise le confort
Participant 1
Consommations journalières en Wh
Phase nudges


Profil qui favorise le confort
Paricipant 2
Consommations journalières en Wh
Phase nudges

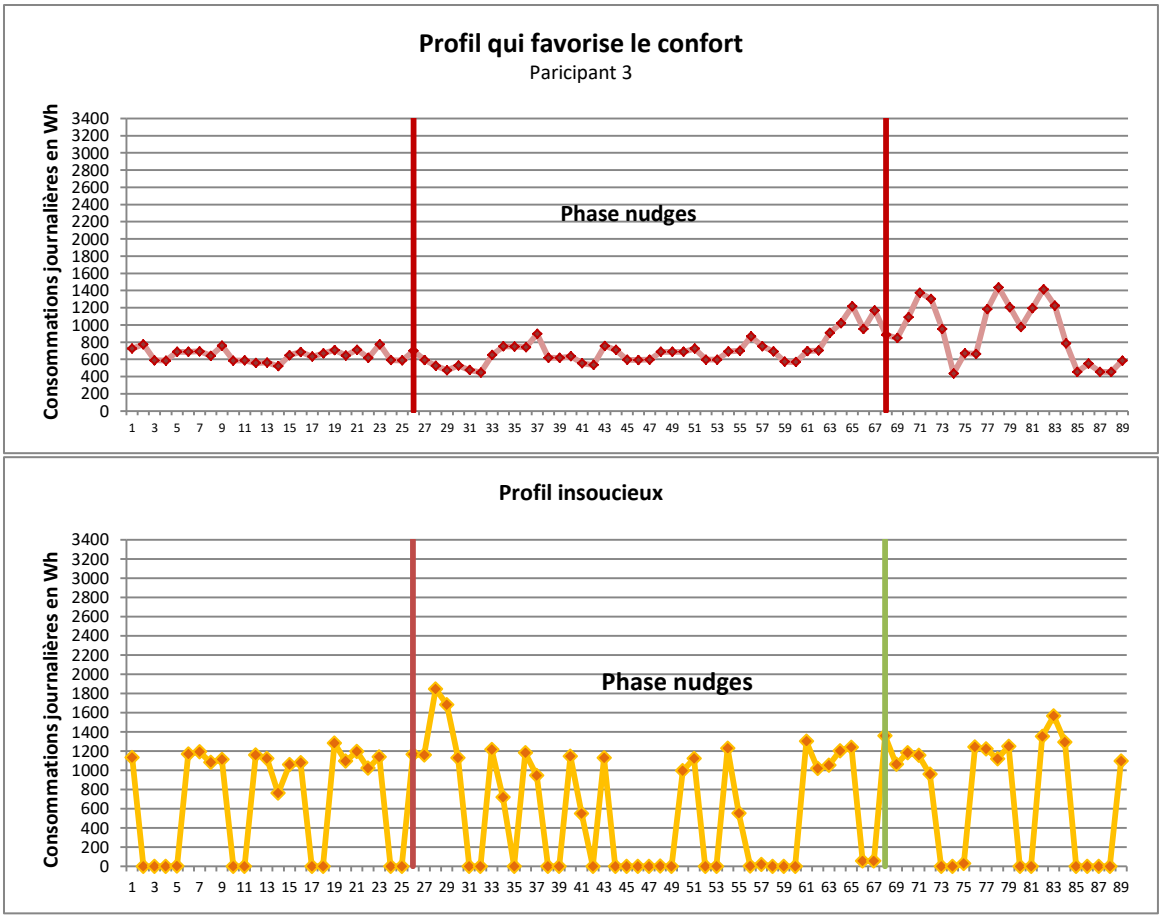
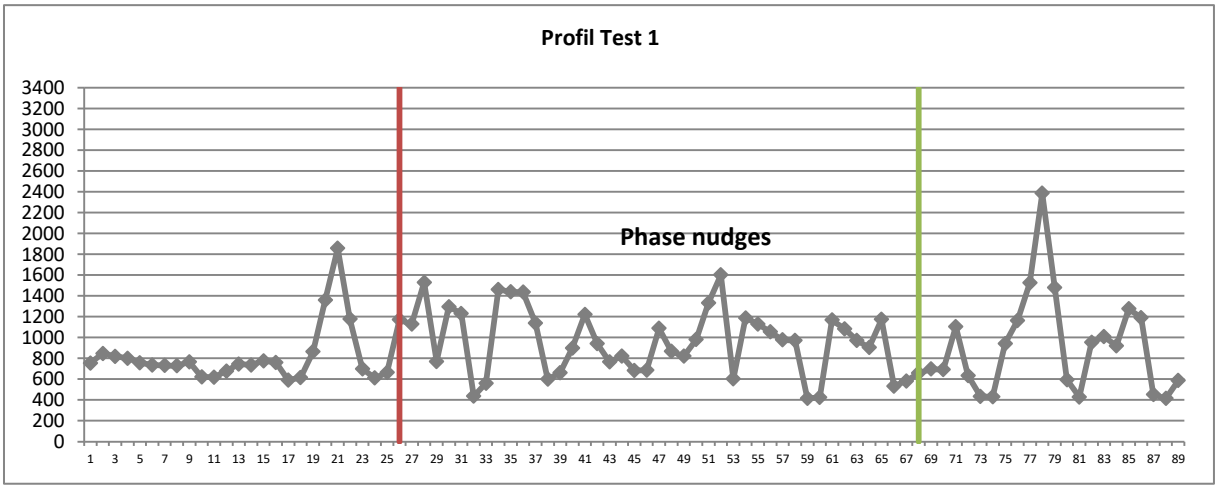


Figure 73 : Consommations journalières des différents participants durant toute la durée de l'expérimentation

Nous présentons aussi l'évolution des consommations d'énergie pour les deux cas test :



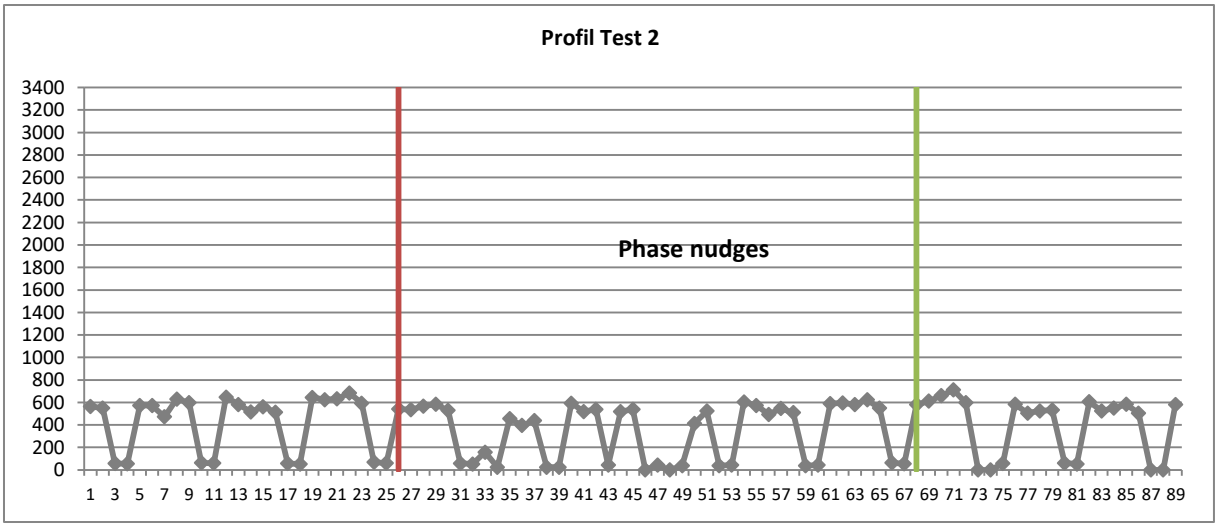


Figure 74 : Consommations journalières des profils test durant toute la durée de l'expérimentation

Nous remarquons de façon générale une réduction des consommations d'énergie pour les différents profils durant la durée de l'application des nudges. Pour certains cas, l'effet des nudges s'arrête avec l'arrêt de leur application et les consommations d'énergie remontent à nouveau. Il s'agit d'un constat qui a été souligné dans d'autres travaux qui ont eu recours aux nudges (Kamilaris et al., 2015). Nous remarquons aussi des consommations d'énergie inutiles même pendant les weekends pour certains profils. Ceci conforte l'idée qu'une grande part des consommations d'énergie dans les bureaux proviennent de consommations en dehors des heures d'occupation, ce que relate certains travaux (Gul and Patidar, 2015, Anand et al., 2019).

Les efforts pour sensibiliser les occupants sur la nécessité de réduire leurs consommations d'énergie trouvent donc bien leur sens dans ce contexte.

Afin d'avoir une idée plus claire sur les réductions de consommations de chaque profil, nous nous intéressons aux variations hebdomadaires des consommations d'énergie de chaque profil tout au long de toute la durée de l'expérimentation et le pourcentage d'augmentation ou de réduction de ces consommations d'une semaine à une autre (**Tableau 40**).

Nous présentons aussi dans le même tableau le nombre de visites des pages des nudges de la part des participants. Cette information est importante pour ce qui concerne l'implication des participants dans une telle stratégie et donne une idée de l'acceptabilité des nudges. Nous ne tenons pas compte des semaines de congés.

		Impliqué	Moyen 1	Moyen 2	Moyen 3	Connaissance	Confort 1	Confort 2	Confort 3	Insoucieux
Avant nudges	S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	-0.022	-0.304	0.007	-0.008	-0.129	-0.439	-0.076	-0.066	-0.097
	S3	0.169	-	0.532	-0.265	0.005	0.317	0.221	0.080	0.107
Nudges	S4	-0.116	0.619	0.068	0.216	0.112	-0.015	0.146	-0.184	0.218
	Visites	**1**	**0**	**1**	**1**	**0**	**Stickers**	**2**	**0**	**1**
	S5	-0.061	-0.054	0.070	-0.278	0.047	-0.130	-0.092	0.333	-0.256
	Visites	**-**	**Stickers**	**1**	**1**	**1**	**Stickers**	**2**	**Stickers**	**Stickers**
	S6	-	-0.196	-0.206	-0.144	-0.123	-0.372	-0.501	0.167	-0.302

	Visites	**2**	**0**	**1**	**0**	**1**	**6**	**5**	**2**	**2**
	S7	0.137	-0.364	-0.147	0.507	-0.284	-	-0.412	-0.079	0.064
	Visites	**2**	**2**	**4**	**2**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**
	S8	-0.180	-0.409	-0.265	-0.398	-0.016	0.281	0.381	0.039	0.016
	Visites	**2**	**0**	**1**	**2**	**0**	**1**	**0**	**2**	**0**
	S9	-	0.307	-0.085	-0.083	-0.023	0.146	0.356	0.454	0.195
	Visites	**1**	**1**	**2**	**1**	**0**	**1**	**1**	**3**	**0**
Après nudges	S10	-0.113	-0.145	0.141	0.362	0.597	-0.322	-0.109	0.041	-0.035
	S11	-0.022	0.330	0.709	-0.037	0.148	0.405	-0.250	0.060	0.078
	S12	0.129	0.149	-0.092	-0.310	-0.201	0.128	-0.573	-0.198	0.276

Tableau 40 : Variation des consommations d'énergie de semaine en semaine pour les différents profils

Nous remarquons pour tous les profils des réductions de consommations d'énergie à partir de la deuxième semaine de l'expérimentation, avant la mise en place des nudges. Cette première réduction de consommations peut être liée à l'installation des capteurs dans les différents bureaux, ce qui crée un effet de norme sociale qui ne tarde pas à s'estomper dès la semaine suivante et ce pour presque tous les profils.
Nous pouvons déjà simplement remarquer des réductions de consommations d'énergie à partir de la deuxième semaine d'application des nudges. Ces réductions varient entre 5 % et 28 % selon le profil. On note aussi de faibles augmentations ne dépassant pas les 7 % pour certains individus des profils « manque de connaissance » et « moyen ». Un individu du profil « valorise le confort » présente une augmentation de consommations de 33 %. À noter que ces deux premières semaines étaient consacrées aux nudges de type informatif. On peut alors se demander s'il existe un lien entre le nudge utilisé, le profil et les réductions des consommations d'énergie. C'est un point que nous allons d'ailleurs aborder dans la partie qui va suivre.

Nous remarquons aussi pour cette première semaine de nudges une implication de la part des participants qui ont visité la plateforme minimum une fois durant les deux semaines.

Pour la suite de la période des nudges, nous remarquons toujours des réductions de consommations d'énergie pour la plupart des participants sauf le participant de profil « insoucieux » qui présente des réductions de consommations que la semaine après la fin de l'application des nudges. Il en est de même pour le participant 3 du profil « qui favorise le confort ».
Une autre constatation qui nous amène à investiguer le lien entre le profil, le nudge et la variation de consommations est l'augmentation pour des semaines spécifiques des consommations d'énergie chez certains profils. Cela fait penser que certains nudges sont plus efficaces pour ces profils que d'autres. Par exemple, le participant 2 du profil « qui favorise le confort » a commencé à montrer des réductions de consommations dès l'application des nudges. Cependant il a connu des augmentations de consommations durant les deux dernières semaines des nudges avant de diminuer à nouveau ses consommations à la fin des nudges.

Pour certains profils, les réductions de consommations d'énergie continuent même après la fin de l'envoi des nudges. Cette rémanence dans l'effet du nudge est plutôt prometteuse. Cela n'est pas le cas pour certains profils comme le participant 1 du profil « moyen », le participant 1 du profil « qui favorise le confort » et le profil « insoucieux ».

Pour une vision plus générale et globale de l'effet des nudges sur les consommations d'énergie, nous comparons les consommations d'énergie de la dernière semaine de l'application des nudges par rapport aux consommations initiales (**Tableau 41**). Nous remarquons de façon

générale, une baisse des consommations sauf pour le profil « insoucieux » et le participant 2 du profil « qui favorise le confort » qui ont une légère augmentation dans leurs consommations. Le participant 3 du profil « qui favorise le confort » possède dans la dernière semaine des nudges des consommations beaucoup plus importantes que celles au début de l'expérimentation. Cela montre que pour la plupart des participants, l'impact directement constaté après l'application des nudges est positif.

Trois semaines après l'application des nudges, si nous comparons la consommation de la semaine avec la consommation de la semaine avant l'application des nudges (**Tableau 41**), nous remarquons une réduction pour la plupart des participants sauf toujours pour le participant 3 du profil « qui favorise le confort » et le profil « insoucieux » qui présentent respectivement 20 % et 27 % d'augmentation dans leur consommation. Ceci nous donne une idée sur l'effet des nudges quelques semaines après leur application ; ils permettent des réductions allant jusqu'à 30 % par rapport à une consommation initiale avant leur application mais ne sont pas efficaces plus longtemps pour tous les profils. L'effet s'arrête en effet directement avec la fin des nudges pour ces profils.

Profil	Impliqué	Moyen 1	Moyen 2	Moyen 3	Connaissance	Confort 1	Confort 2	Confort 3	Insoucieux	Profil Test 1	Profil Test 2
Pourcentage de variation des consommations à la fin des nudges	-0.314	-0.247	-0.344	-0.27	-0.198	-0.092	0.072	0.438	0.033	0.294	0.044
Pourcentage de variation des consommations à la fin de l'expérimentation	-0.225	-0.259	-0.32	-0.314	0.023	-0.306	-0.593	0.201	0.271	0.254	0.044

Tableau 41 : Variation totale des consommations d'énergie pour chaque profil entre le début et la fin de l'expérimentation

Afin de se pencher plus sur les consommations durant la période des nudges et comprendre l'impact des variations des consommations d'énergie durant la période d'application des nudges, nous nous intéressons aux moyennes des consommations hebdomadaires durant le trois phases : Avant les nudges, Durant les nudges, et Après les nudges (**Figure 75**).

Nous constatons que pour la plupart des profils, la valeur moyenne des consommations hebdomadaires durant la période des nudges est inférieure à la valeur moyenne de ces consommations avant le début de l'application des nudges, sauf pour le participant 3 du profil « qui favorise le confort » et le participant 2 du profil « moyen » ainsi que le profil « insoucieux ».

Cela montre que sur une longue période, et en dehors des variations possibles entre une semaine et une autre, l'impact global est positif tout au long de la durée de l'application des nudges. Nous pouvons alors nous attendre à un tel résultat pour une durée plus longue, comme une année par exemple. Après l'application des nudges, la moyenne des consommations hebdomadaires sans les nudges est inférieure à celle durant les nudges pour les profils suivants : impliqué, moyen (participants 1 et 3), profil qui favorise le confort (participants 1 et 2). Cela indique que pour ces profils, les consommations d'énergie ont continué à baisser même après

l'arrêt des nudges. Pour le participant représentant le profil « manque de connaissances », les consommations d'énergie hebdomadaires ont augmenté après l'arrêt des nudges, alors qu'elles avaient diminué lors de l'application des nudges. On peut faire donc la constatation que ce type de profils nécessite le maintien des rappels et des informations pour maintenir les réductions de consommations. Cependant, cette constatation ne peut pas être généralisée pour ce type de profils vu que nous ne possédons qu'un seul représentant de ce profil dans cette expérimentation. Pour les profils dont la moyenne des consommations d'énergie hebdomadaire durant les nudges est supérieure à celle avant les nudges, cette moyenne s'accroit aussi après la fin de l'application des nudges. Nous pouvons dire dans ce cas que les nudges pour ces participants en particulier n'étaient pas efficaces. Ces profils sont d'ailleurs ceux qui ont le moins d'intention de changer de comportements et qui présentent le plus de blocages.
Les profils test représentent aussi les profils pour lesquels les nudges n'ont pas été efficaces. Nous remarquons en effet, des moyennes de consommation pendant et après les nudges supérieures à celles avant les nudges.

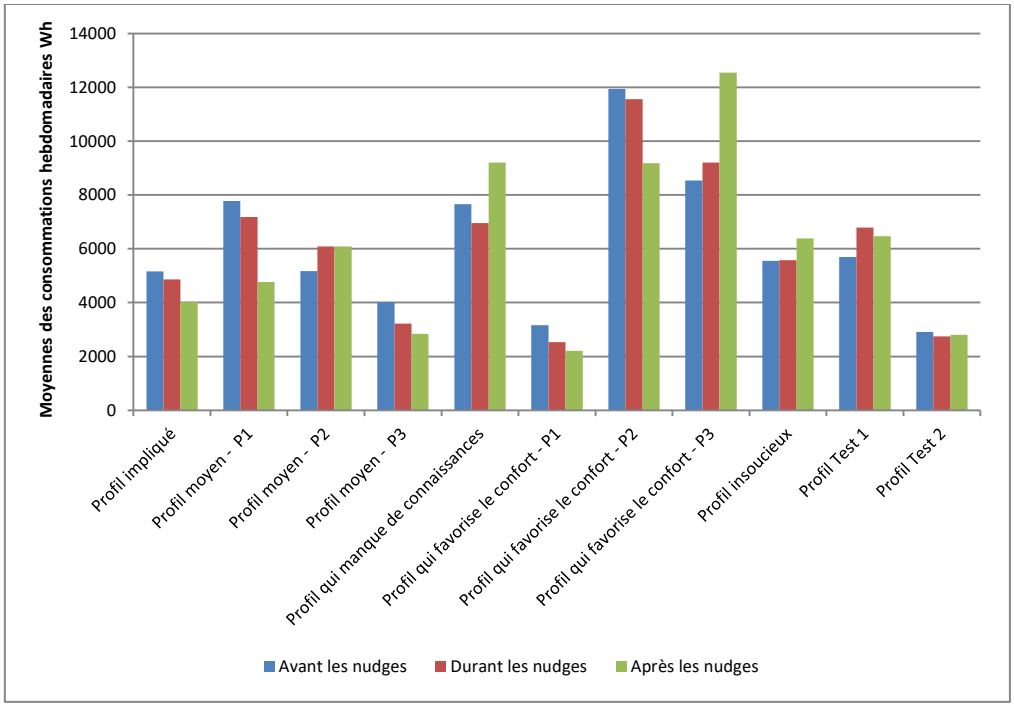


Figure 75: Moyennes des consommations hebdomadaires des différents profils tout au long de l'expérimentation

Afin de résumer ce qui précède et avoir une idée des profils pour lesquels les nudges ont été efficaces et ceux qui ont représenté une exception, nous dressons le tableau récapitulatif ci-dessous :

Profil	**Impliqué**	**Moyen 1**	**Moyen 2**	**Moyen 3**	**Connaissance**	**Confort 1**	**Confort 2**	**Confort 3**	**Insoucieux**
Réductions suite à la première phase des nudges par rapport à la semaine avant nudge	OUI	NON	NON	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI
	-17.7%	56.5%	13.8%	-6.2%	15.9%	-14.5%	5.4%	-14.9%	-3.8%
Classement	1	9	7	4	8	3	6	2	5

Réductions suite à la deuxième phase des nudges par rapport première phase de nudges	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON
	13.7%	-56.0%	-35.3%	36.3%	-40.7%	-37.2%	-91.3%	8.8%	-23.8%
Classement	8	2	5	9	3	4	1	7	6
Réductions suite à la dernière phase des nudges par rapport à la deuxième phase de nudges	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON
	-18.0%	-10.2%	-35.0%	-48.1%	-3.9%	42.7%	73.7%	49.3%	21.1%
Classement	3	4	2	1	5	7	9	8	6
Réductions totales à la fin de l'expérimentation par rapport au début de l'expérimentation	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NON
	-22.5%	-25.9%	-32.0%	-31.4%	2.3%	-30.6%	-59.3%	20.1%	27.1%
Classement	6	5	2	3	7	4	1	8	9
Réductions de la moyenne des consommations hebdomadaires lors de la phase de nudges par rapport aux moyennes des consommations hebdomadaires avant les nudges	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON
	-5.7%	-7.6%	17.5%	-19.8%	-9.1%	-19.8%	-3.2%	7.7%	0.5%
Classement	5	4	9	2	3	1	6	8	7
Réductions de la moyenne des consommations hebdomadaires lors de la phase après les nudges par rapport aux moyennes des consommations hebdomadaires avant les nudges	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NON
	-21.9%	-38.7%	17.6%	-29.3%	20.2%	-30.2%	-23.2%	46.8%	15.1%
Classement	5	1	7	3	8	2	4	9	6

Tableau 42 : Récapitulatif et classement de l'ensemble des réductions de consommations pour tous les profils

Nous constatons donc que les profils qui nécessitent plus d'effort et sont caractérisés par une volonté faible de changer de comportement, sont en effet les profils dont les consommations d'énergie ont augmenté après la fin de l'application des nudges.

6.2 *Impact du type de nudge choisi*

Pour mieux comprendre l'impact de chaque nudge sur les différents profils, et pour une meilleure visualisation des variations des consommations d'énergie suite à l'application des différents types de nudges, nous présentons les graphiques ci-dessous. Ils représentent les variations de consommations d'énergie durant les deux semaines avant les nudges, les six semaines de nudges et les trois semaines après les nudges. Nous indiquons le type de nudges appliqués à chaque fois. Pour les semaines avant et après les nudges, nous indiquons : Avant, ou Après.

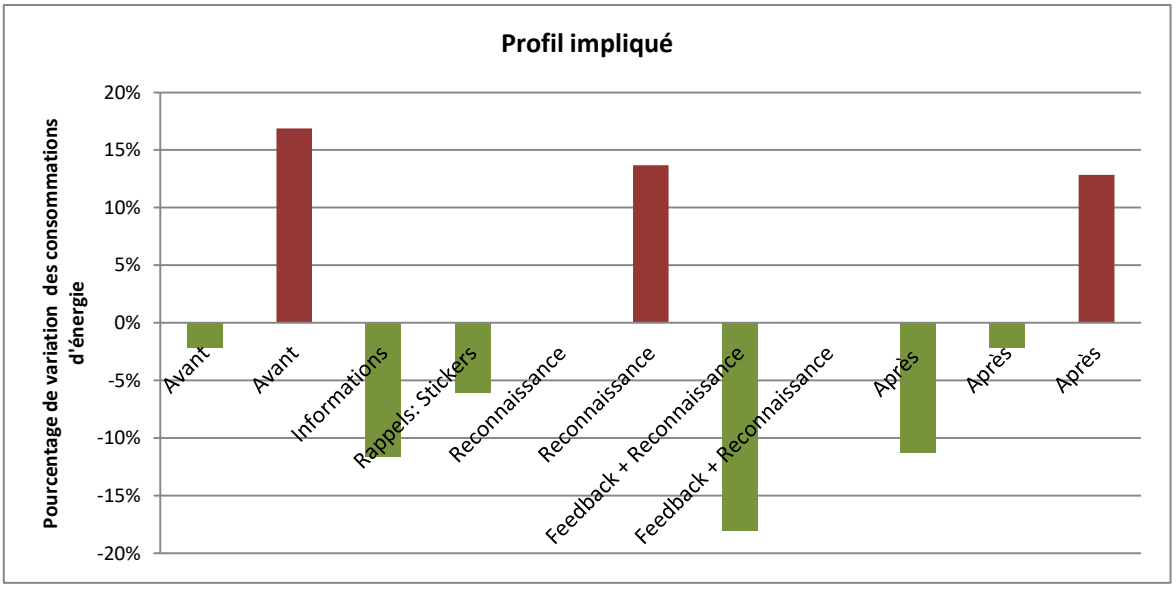


Figure 76: Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le profil impliqué

Nous avons fait l'hypothèse pour le profil impliqué que le nudge le mieux adapté est celui des informations cognitives ainsi que le nudge de reconnaissance. D'après les résultats obtenus, il apparait dans ce cas que les nudges de rappels et d'information ont aussi eu un impact positif sur la réduction des consommations d'énergie. La reconnaissance seule n'a par ailleurs pas permis de maintenir certains écogestes. Cependant, une fois couplée avec un nudge de norme morale, les résultats sont positifs et permettent une importante réduction (**Figure 76**).

Pour le profil moyen, l'hypothèse du nudge le mieux adapté est celui de la norme morale, des encouragements et de la reconnaissance pour dépasser la vision personnelle faible et le nudge de compétition ou de norme sociale suivant chaque individu pour booster le changement de comportement. D'après les résultats obtenus, il apparait que les nudges de feedback et de reconnaissance permettent à ce type de profil de changer de comportement et conduisent à des réductions des consommations d'énergie. La norme morale ne semble pas avoir beaucoup d'impact sur ce type de profil. Par ailleurs, les rappels permettent une réduction des consommations pour certains participants appartenant à ce profil. La comparaison et l'image sociale permettent aussi des réductions de consommations d'énergie (Figure 78 et Figure 79).

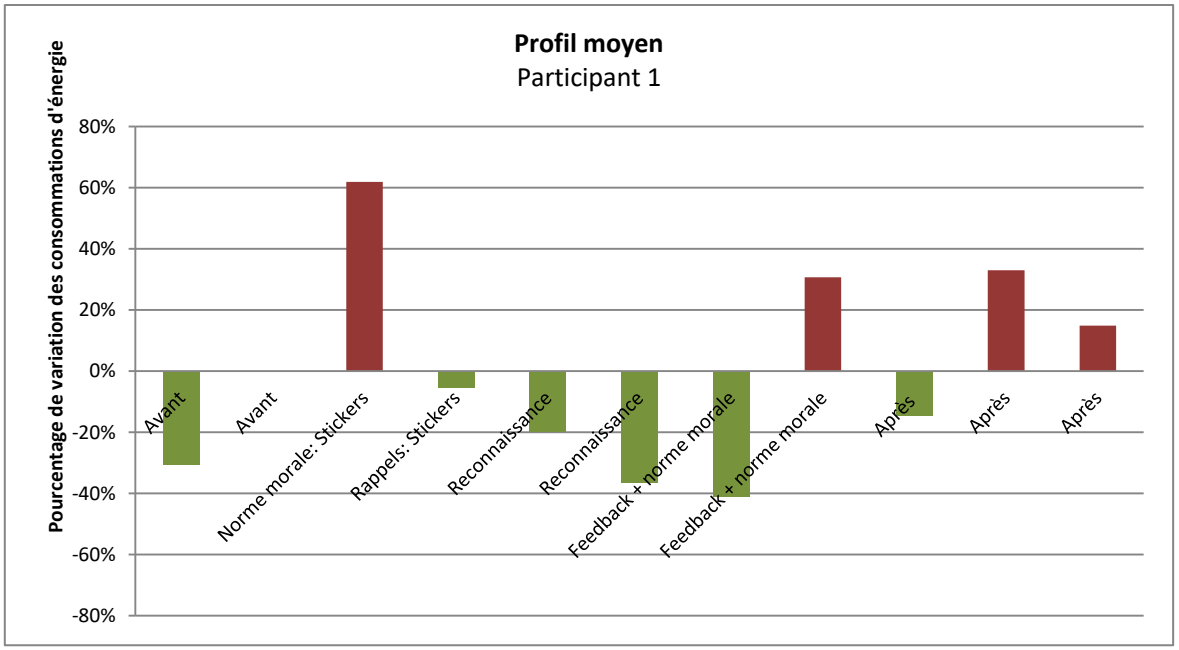


Figure 77: Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le participant 1 du profil moyen

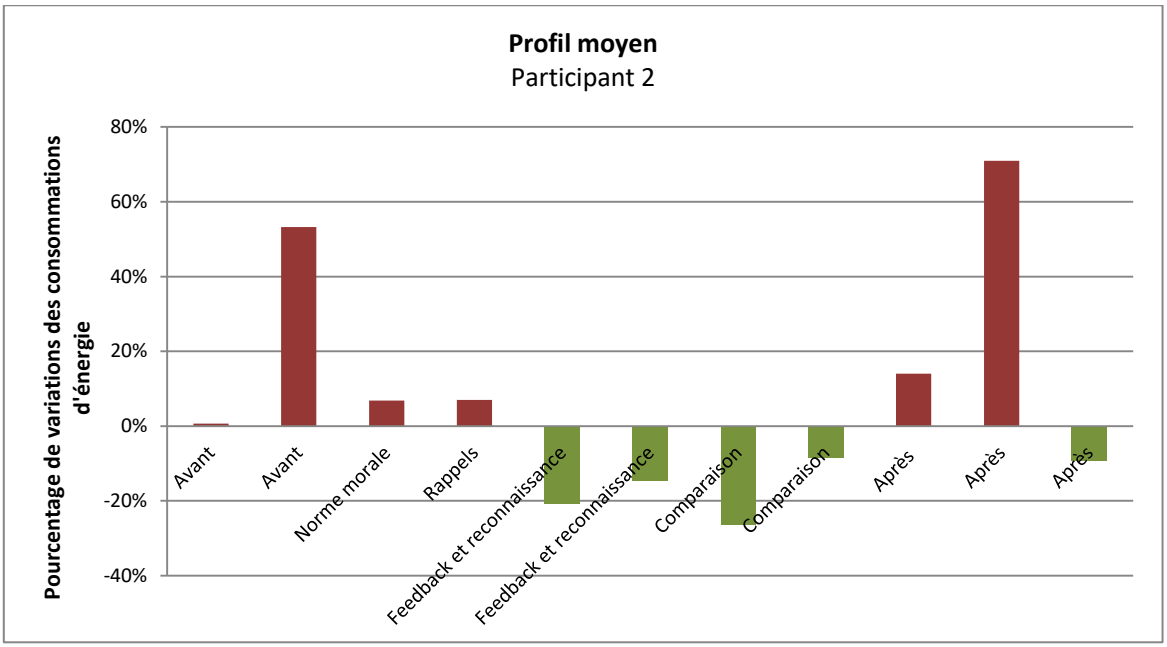


Figure 78 : Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le participant 2 du profil moyen

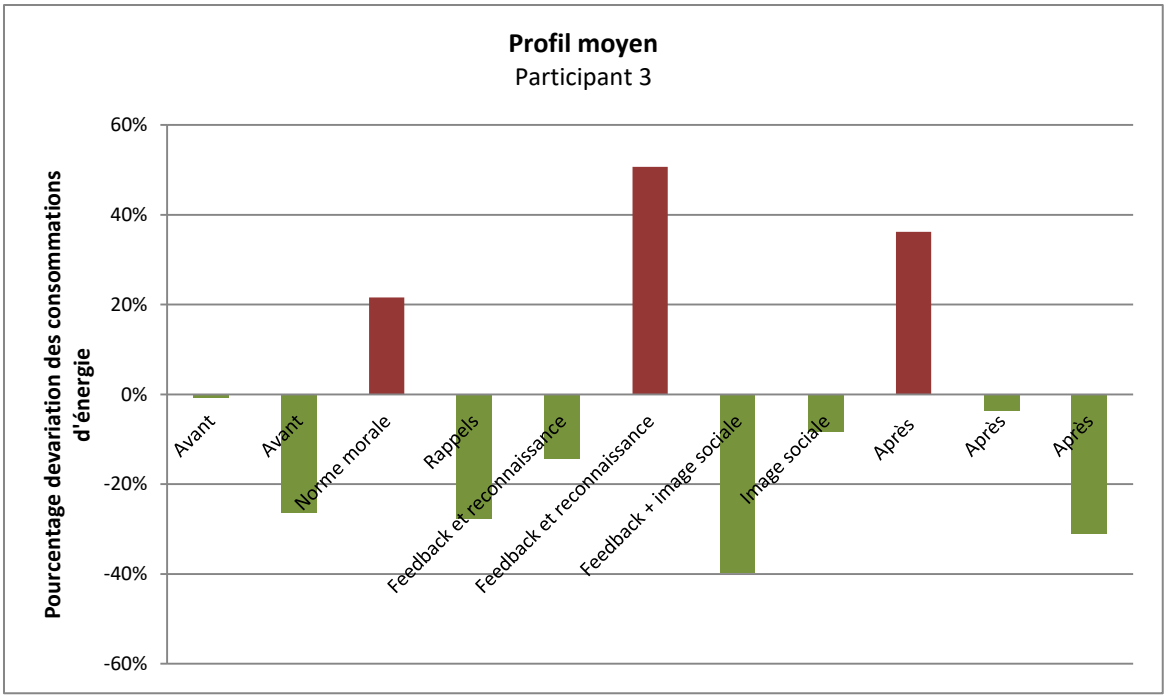


Figure 79: Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le participant 3 du profil moyen

Nous avons ensuite fait l'hypothèse pour le profil qui manque de connaissances qu'un nudge procurant des rappels et des informations ciblées pourraient conduire à un changement de comportement. Nous remarquons par ailleurs que pour le participant appartenant à ce profil, la comparaison et la reconnaissance ont eu plus d'impact que les informations et les rappels qui eux n'ont pas conduit à des réductions de consommations d'énergie (**Figure 80**).

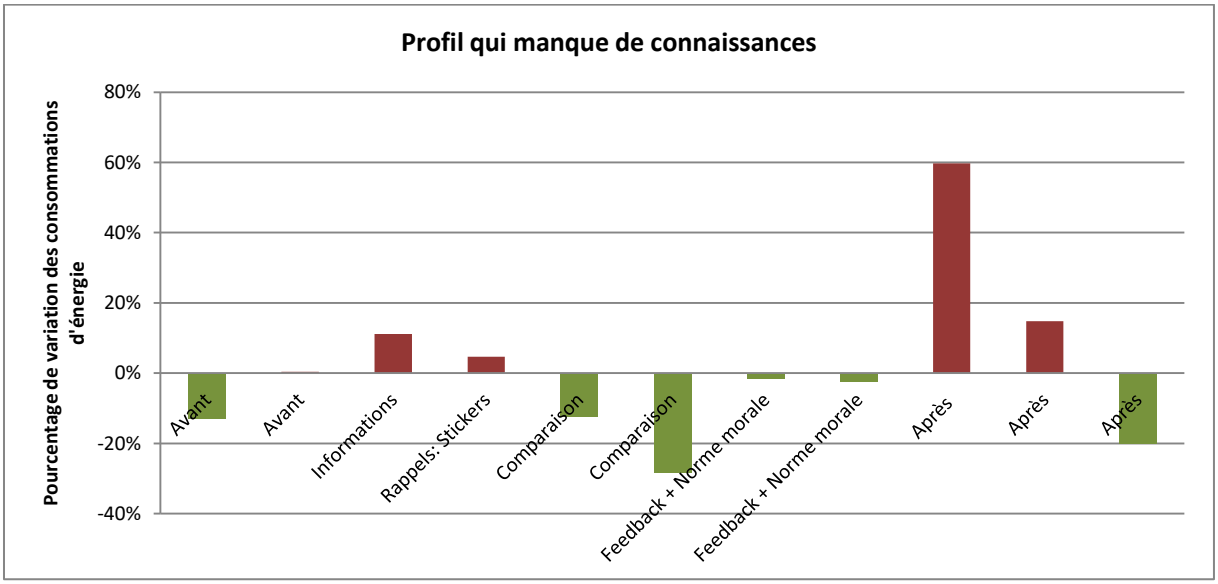
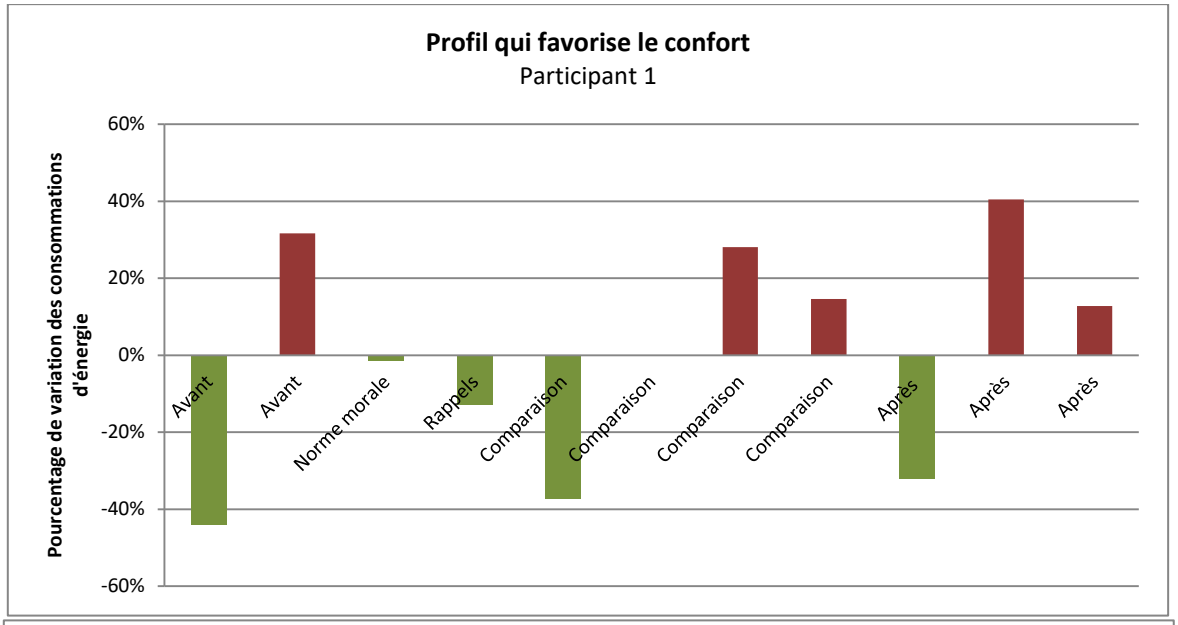
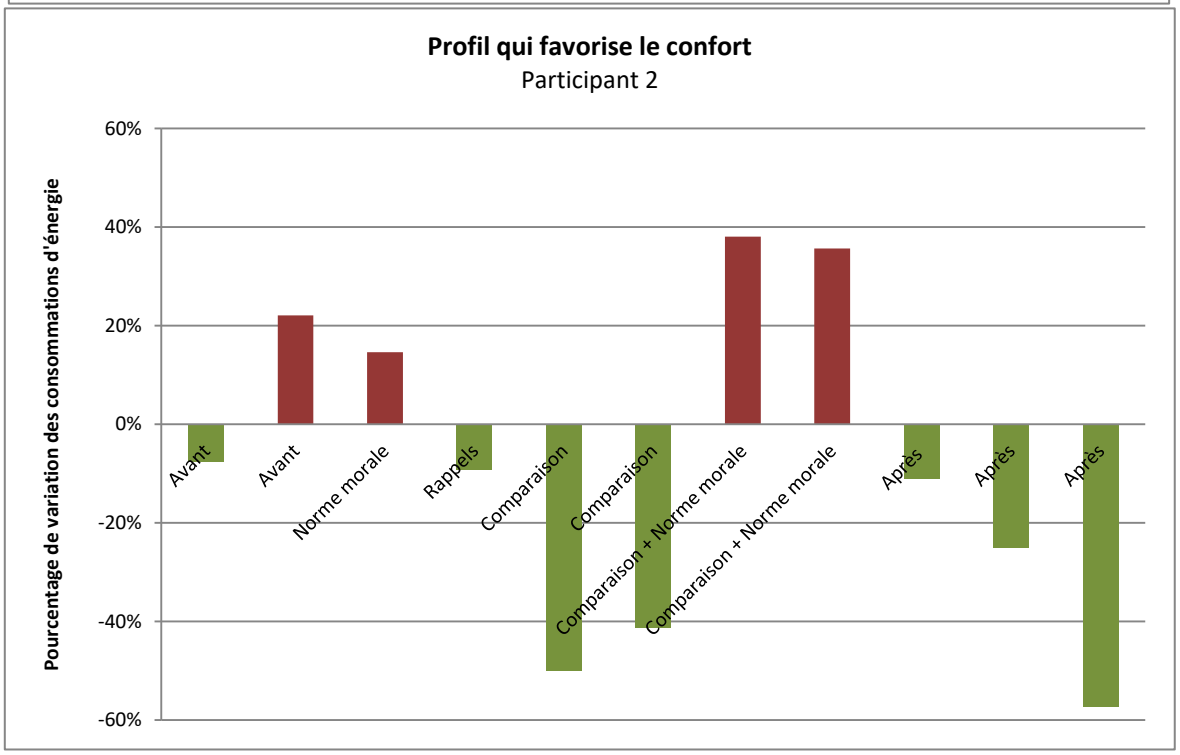


Figure 80 : Variations des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour le profil qui manque de connaissances

Pour le cas des occupants qui favorisent leur confort, nous avons fait l'hypothèse que dans ce cas il vaudrait mieux utiliser des nudges comme celui de la comparaison ou de la norme morale pour détourner l'attention du participant et l'impliquer par l'image et la compétition dans la réduction

des consommations d'énergie. Il apparait d'après les résultats que le nudge de comparaison est le plus efficace comparé à d'autres nudges dans le cas de ce profil (**Figure 81**).





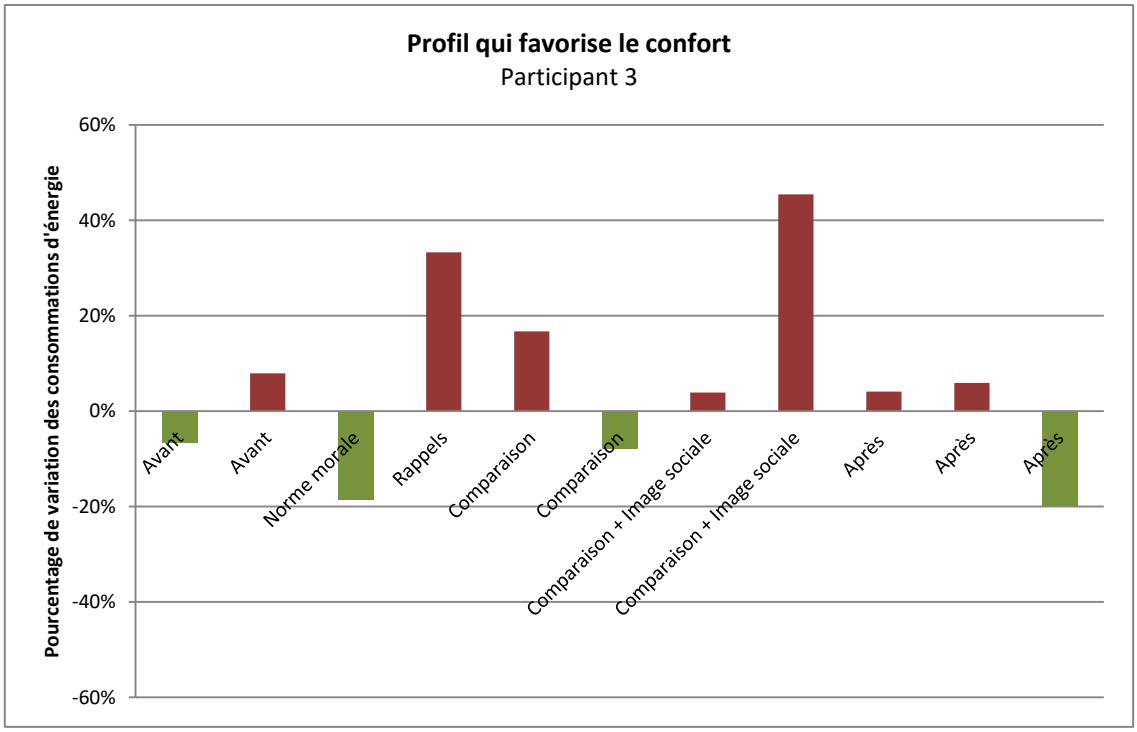


Figure 81 : Variation des consommations d'énergie suivant le type de nudges pour les participants 1, 2 et 3 du profil qui favorise le confort

Finalement, pour le profil dit insoucieux, nous avions émis l'hypothèse d'une nécessité d'informer d'abord, d'encourager avec le feedback et la reconnaissance et finalement des nudges pour plus impliquer comme la comparaison et la norme sociale. D'après les résultats obtenus pour un seul représentant de ce profil, il apparait que les rappels et la reconnaissance ont un effet positif sur le changement de comportement des participants appartenant à ce profil (**Figure 82**).

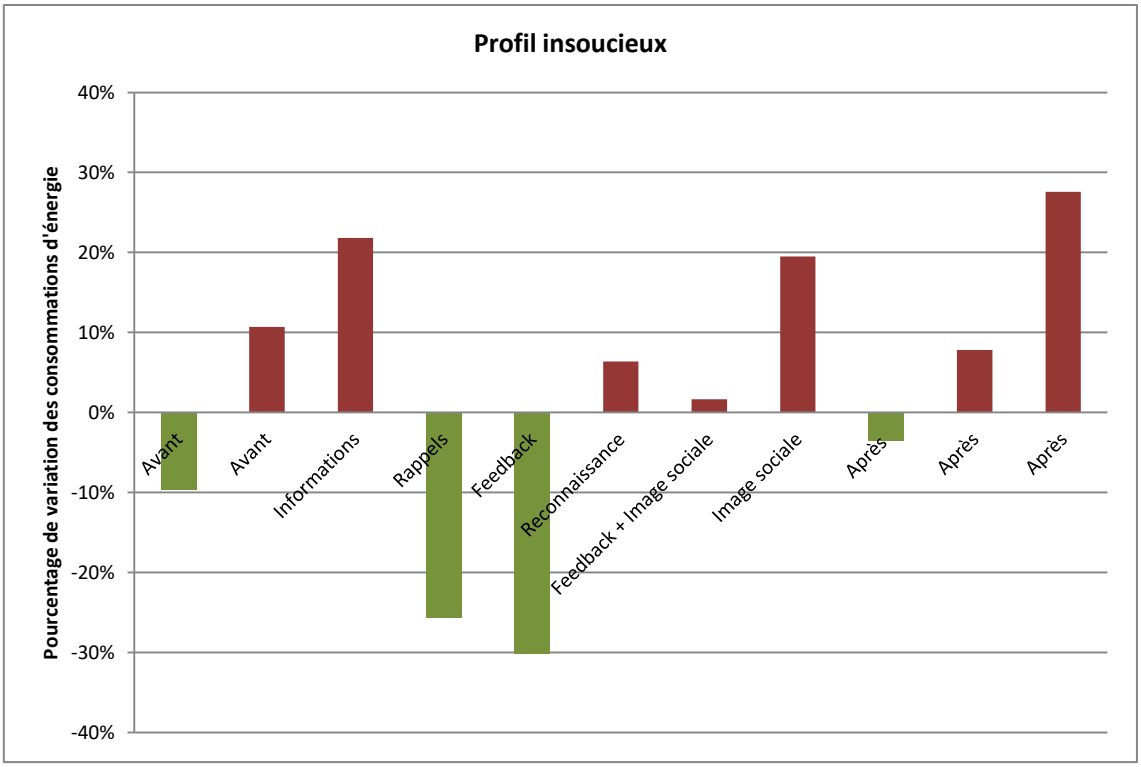


Figure 82 : Variations des consommations d'énergie pour le profil insoucieux

Pour conclure sur les résultats obtenus en ce qui concerne d'abord les incitations et leurs liens avec les profils étudiés et ensuite par rapport à leur impact sur une longue durée, nous avons constaté ce qui suit :

- Certaines hypothèses émises concernant les incitations les mieux adaptées aux différents profils suivant leurs caractéristiques ont pu être confirmées. Ils peuvent représenter une base d'étude pour des prochains travaux ciblant en particulier ce type de nudges pour augmenter le taux de résultats positifs.
- Vu le nombre limité de représentants pour chaque profil, ce premier travail a permis de donner une idée du type de nudges à adopter pour chaque profil et de se positionner sur un nombre défini de nudges au lieu de plusieurs types d'incitations possibles.
- L'effet des nudges a connu un arrêt pour un type particulier de profils : insoucieux et qui favorise le confort. Ceci est un constat auquel nous nous attendions si on part du postulat que ce type de profils a une faible intention de changer le comportement et pour lequel le but du nudge était de permettre de dépasser certains blocages comme la favorisation du confort, la paresse et le manque de sens de responsabilité. On peut conclure que dans le cas de ce type de profils, si plus d'efforts sont adressés et les nudges maintenus en continu pour assurer une adoption du bon comportement de la part des individus concernés, alors nous pourrions envisager des résultats probants.

6.3 *Impact des nudges sur le changement de comportements*

6.3.1 *Adoptions des écogestes*

Les variations de consommations d'énergie présentées précédemment ne sont que la traduction d'un changement de comportements chez les occupants. C'est pourquoi, nous investiguons à travers les données dont nous disposons la variation de l'adoption, chez les occupants, des

écogestes encouragés à travers l'usage des nudges. Nous comparons le nombre de fois où ces écogestes étaient adoptés avant, pendant et après la phase nudges. Nous présentons les résultats pour les deux profils « impliqué » et « insoucieux » dans les tableaux ci-dessous :

- Profil "insoucieux"

Poste de consommation	Ecogeste	Nombre de fois d'adoption de l'écogeste				
		Avant nudge	Phase 1 nudges	Phase 2 nudges	Phase 3 nudges	Après nudges
Ordinateur	Mettre en veille l'ordinateur en cas de pause	**12**	**18**	**12**	**16**	**5**
Écran	Éteindre l'écran à chaque fois que l'occupant fait une pause.	**10**	**30**	**4**	**6**	**9**
Éclairage	Favoriser l'éclairage naturel	**28**	**33**	**37**	**29**	**20**
	Éteindre les lumières à chaque fois que tu quittes ton bureau.	**10**	**30**	**9**	**4**	**6**
Autres équipements	Éteindre la machine à café	**9**	**7**	**13**	**11**	**4**
	Éteindre la bouilloire au bon moment	-	-	-	-	-
Consignes chauffage		22,5 °C				

Tableau 43 : Récapitulatif de l'adoption des écogestes durant l'expérimentation pour le profil « insoucieux »

- Profil "impliqué"

Poste de consommation	Ecogeste	Nombre de fois d'adoption de l'écogeste				
		Avant nudge	Phase 1 nudges	Phase 2 nudges	Phase 3 nudges	Après nudges
Ordinateur	Mettre en veille l'ordinateur en cas de pause	**9**	**15**	**17**	**18**	**6**
Écran	Éteindre l'écran à chaque fois que l'occupant fait une pause.	5	11	6	5	13
Éclairage	Éteindre les lumières à chaque fois que tu quittes ton bureau.	9	22	26	29	14
Autres équipements	Éteindre la machine à café	3	20	11	7	2
	Éteindre la bouilloire au bon moment	5	4	10	5	4
Consignes chauffage		22,5 °C				

Tableau 44 : Récapitulatif de l'adoption des écogestes durant l'expérimentation pour le profil « impliqué»

Cette démonstration de l'évolution de l'adoption des écogestes par les deux profils est en concordance avec ce que nous avons analysé en ce qui concerne les consommations d'énergie. En effet, la période des nudges permet une adoption des écogestes ; seulement le maintien de ces écogestes est difficile après la fin des nudges. L'on se demande si une période plus longue de nudges peut permettre un effet plus long sur le temps même après leur arrêt. Il s'agit ici d'un point intéressant à investiguer dans de futurs travaux.

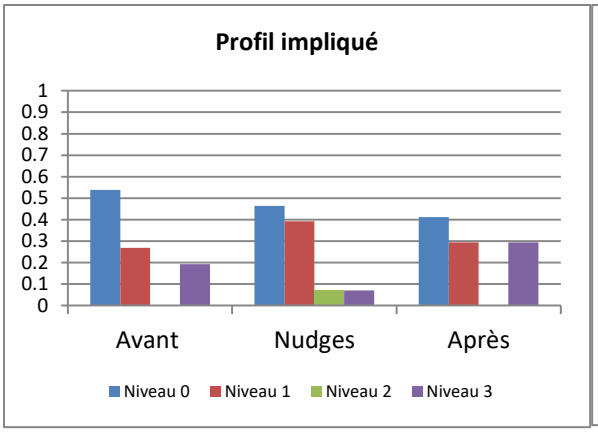
L'analyse de consignes de température, nous a montré que les occupants n'ont pas cherché à changer leurs consignes de températures pour la plupart des profils sauf pour deux participants du profil « qui favorise le confort ». C'est un résultat attendu, vu qu'il s'agit d'un profil qui essaie de maintenir son confort dans le bureau.

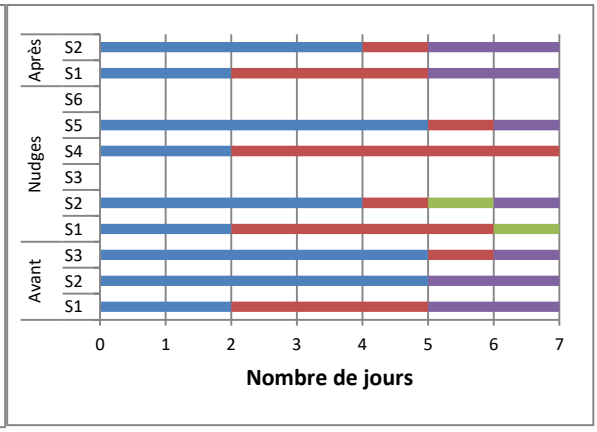
6.3.2 *Les niveaux de comportements*

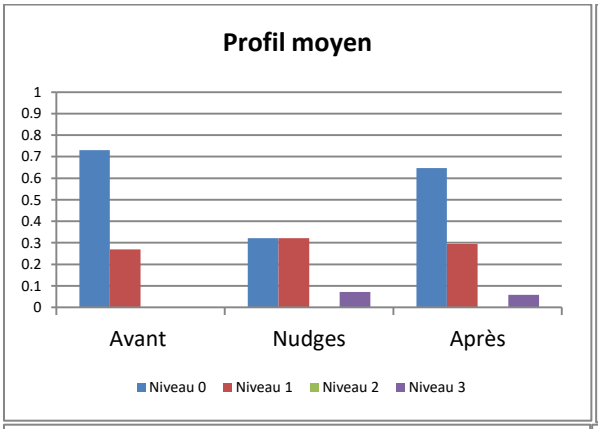
Dans la partie 5.1.3 du Chapitre III, nous avons défini quatre niveaux de comportements différents traduits par une adoption plus ou moins élevée des écogestes, et ce pour chacun des quatre postes de consommation : chauffage, climatisation, éclairage, utilisation des équipements électriques. En se basant sur les données des capteurs, nous analysons le passage d'un niveau à un autre et ce pour chaque jour de l'expérimentation. Pour ce faire, nous calculons au pas horaire et ce pour les mêmes conditions (occupation, niveau d'éclairement, heure) les consommations correspondantes à l'usage des équipements électriques et de l'éclairage si l'occupant correspondait à l'un des quatre niveaux : niveau 1, niveau 2, niveau 3, niveau 4. Nous comparons ensuite le total de ces consommations quotidiennes fictives aux consommations réelles des occupants afin de déterminer à quel niveau l'occupant appartient tout au long d'une journée.

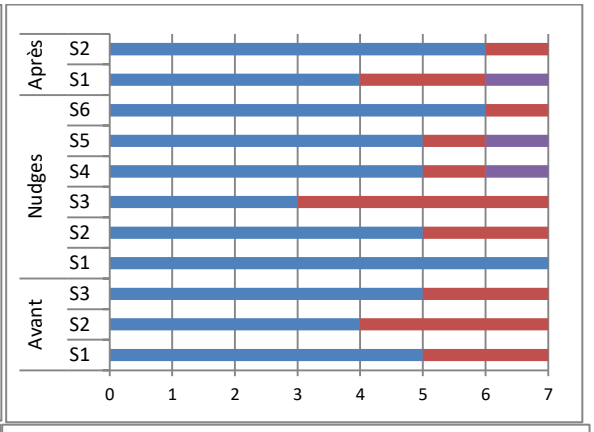
Pour chaque profil, nous affichons l'évolution quotidienne du passage d'un niveau à un autre dans les graphes ci-dessous (Figure 83).

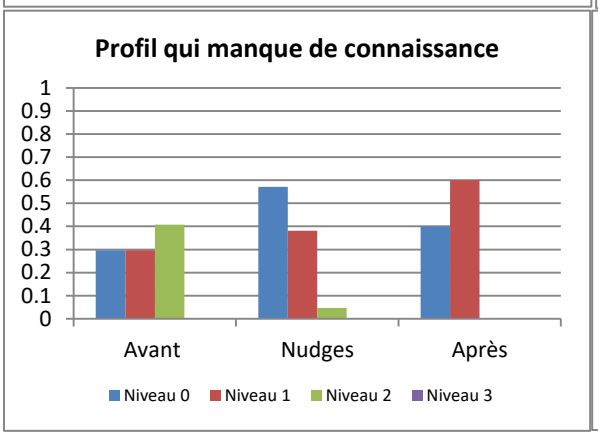
Pour l'évolution du profil impliqué suivant les différents niveaux, nous constatons que l'occupant représentant de ce profil commence dans la phase avant les nudges par un nombre important de journées de niveau 0, mais aussi des journées de niveau 1 et 3. Lors de phase de l'envoi des nudges, les comportements de niveau 2 qui n'étaient jusque-là pas présents dans le quotidien de ce profil, commencent à apparaitre pour 2 jours seulement. Les comportements de Niveau 3 se réduisent et les comportements de Niveau 1 augmentent. Finalement, et après la fin de la phase d'envoi des nudges, nous remarquons une augmentation des journées avec des comportements de Niveau 3 qui s'alignent avec ceux de Niveau 1. Les comportements de Niveau 0 ont été réduits et ceux de niveau 2 disparus. Nous rappelons que les comportements de Niveau 2 sont l'étape intermédiaire avant d'atteindre les Niveau 3 de comportement. Il s'agit généralement de comportements qui se font au départ de l'occupant. Les comportements dans le cas du niveau 3 se font à chaque fois l'occupant n'est pas présent. Nous pouvons donc conclure que la phase nudges a encouragé de plus en plus de comportements de niveau 2, ce qui peut représenter une phase d'apprentissage avant que les comportements de niveau 3 soient complétement adoptés après la fin de la phase des nudges. Ce profil, qui commence déjà par un Niveau 3 important est prêt à accepter plus facilement à changer de comportement et atteindre de plus en plus le Niveau 3.
Cependant, nous ne pouvons pas généraliser ce résultat au vu de l'échantillon et la durée de changement courte, mais cela représente une démarche à apporter dans de futures études afin d'étudier l'impact des nudges sur les consommations d'énergie dans les bureaux.

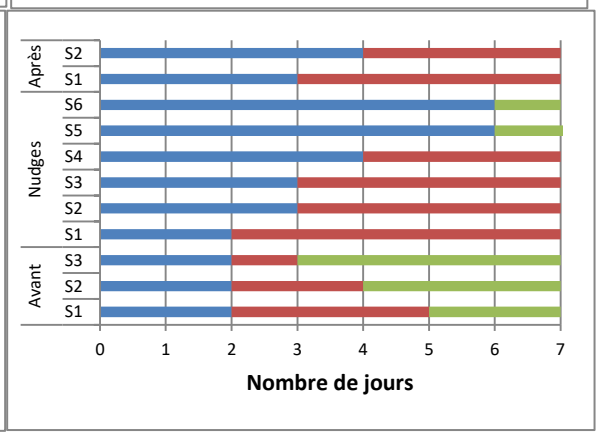

Profil impliqué
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Avant
Nudges
Après
Niveau 0
Niveau 1
Niveau 2
Niveau 3


Après
Nudges
Avant
S2
S1
S6
S5
S4
S3
S2
S1
S3
S2
S1
0
1
2
3
4
5
6
7
Nombre de jours


Profil moyen
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Avant
Nudges
Après
Niveau 0
Niveau 1
Niveau 2
Niveau 3


Après
Nudges
Avant
S2
S1
S6
S5
S4
S3
S2
S1
S3
S2
S1
0
1
2
3
4
5
6
7


Profil qui manque de connaissance
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Avant
Nudges
Après
Niveau 0
Niveau 1
Niveau 2
Niveau 3


Après
Nudges
Avant
S2
S1
S6
S5
S4
S3
S2
S1
S3
S2
S1
0
1
2
3
4
5
6
7
Nombre de jours

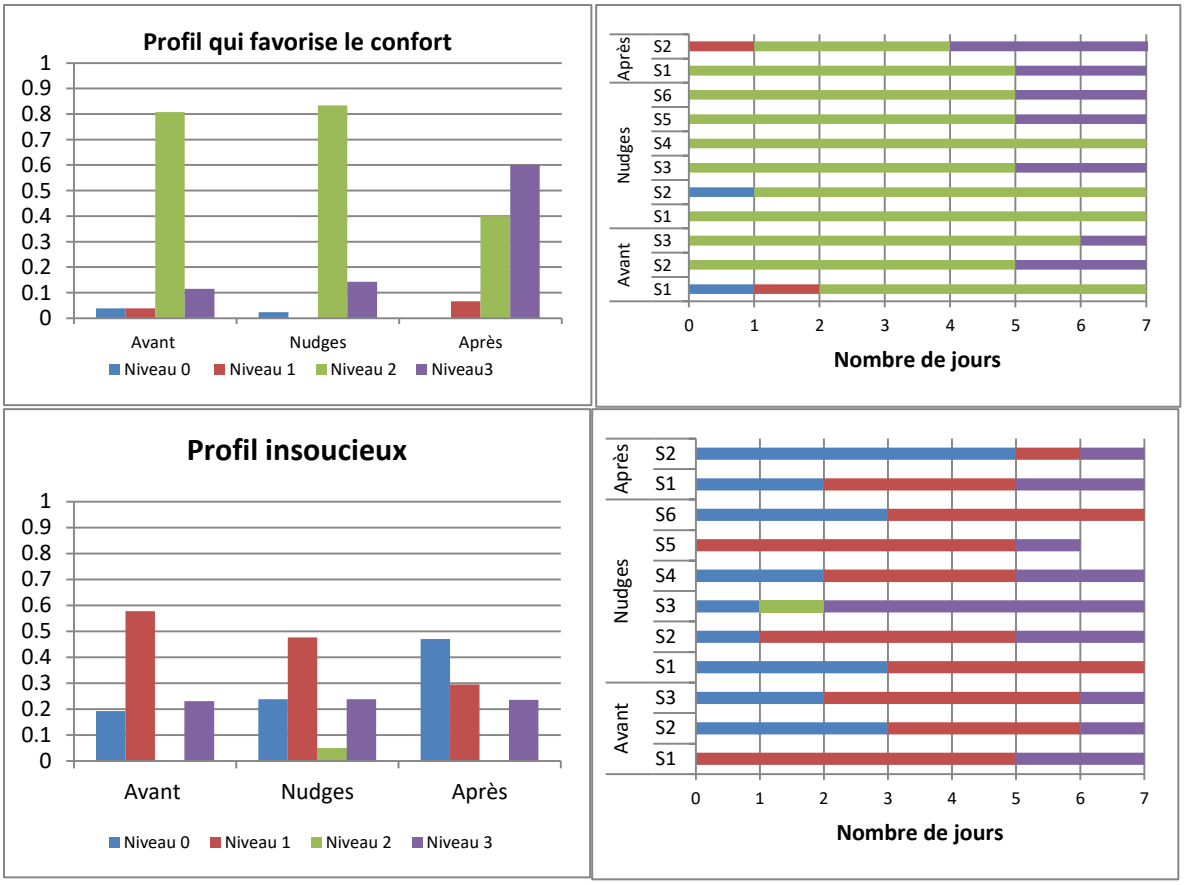


Figure 83 : Evolution quotidienne du passage d'un niveau à un autre

Pour le participant choisi pour représenter le profil moyen, nous remarquons une phase avant nudges caractérisée par des comportements de niveaux 0 et 1. À la fin de la période des nudges, 2 jours ont connu des comportements de niveau 3. Le niveau 3 est aussi présent sur une journée dans la semaine après les nudges.
Nous pouvons conclure que le maintien des consommations de niveau 3 est difficile et que la période des nudges permet de les encourager.

D'autre part, nous avons remarqué auparavant, en analysant les consommations du profil « manque de connaissance » que ce dernier oscillait entre l'augmentation et la réduction de ses consommations d'énergie. Nous avons aussi constaté qu'après l'arrêt des nudges les consommations d'énergie ont augmenté à nouveau. En termes de comportement, ce profil se caractérisait par des comportements équivalents entre niveau 0, niveau 1 et niveau 2, durant la période des nudges, les comportements de niveau 2 ont beaucoup réduit laissant surtout place aux comportements de niveau 1. La différence entre ces deux comportements se base surtout sur la mise en veille des appareils et l'adaptation de l'éclairage suivant la lumière naturelle. On peut dire dans ce cas que les nudges n'ont pas été efficaces pour ce profil qui s'est retrouvé après la fin des nduges avec des comportements de niveau 1 ce qui a augmenté ses consommations d'énergie.

Les nudges ont cependant été efficaces pour le participant 1 du profil « qui favorise le confort ». Ayant à la base des comportements de niveau 2, ce profil a adopté aussi lors de la phase des nudges des comportements de niveau 3, qu'il a maintenus et même augmenté après les nudges.
Finalement, pour le profil insoucieux, on retrouve la phase intermédiaire des comportements de niveau 2. Cependant les comportements de niveau 0 restent les plus dominants, ce qui induit plus de consommations.

Il est en effet intéressant de voir sur un cas pratique l'impact de l'application des nudges en tenant compte des caractéristiques des occupants sur leur changement de comportement. Nous investiguons maintenant l'impact sur une année de ce changement de comportement.

6.3.3 *Généralisation sur une année*

Dans ce qui précède, nous avons analysé l'impact des nudges sur le changement de comportement et sur la réduction des consommations d'énergie. Nous avons représenté les économies d'énergie réalisées ou pas pendant la période d'application des nudges et les semaines qui suivent.

Toutefois, pour déterminer si ces réductions d'énergie ont un impact sur l'ensemble de l'année et s'ils affectent d'autres aspects de la consommation énergétique, nous effectuons une simulation thermique dynamique sur l'ensemble de l'année. Pour cela, nous recréons les mêmes comportements observés pendant les semaines d'application des nudges et les appliquons sur l'ensemble de l'année. Pour le cas du chauffage, nous appliquons les consignes de chauffage uniquement pendant la période de chauffe, tout en maintenant le confort thermique.
L'objectif de cette simulation sur toute l'année et de prendre en compte divers facteurs au même temps. Cela permet de comprendre l'impact global des changements de comportement lorsque tous les gestes sont combinés. Nous évaluons comment ces comportements modifiés influencent la consommation d'énergie tout au long de l'année et si ces changements ont un effet sur d'autres aspects de la consommation énergétique. Par exemple, le fait d'éteindre l'éclairage en hiver peut réduire la consommation d'énergie liée à l'éclairage, mais également priver la pièce de la chaleur générée par les ampoules.

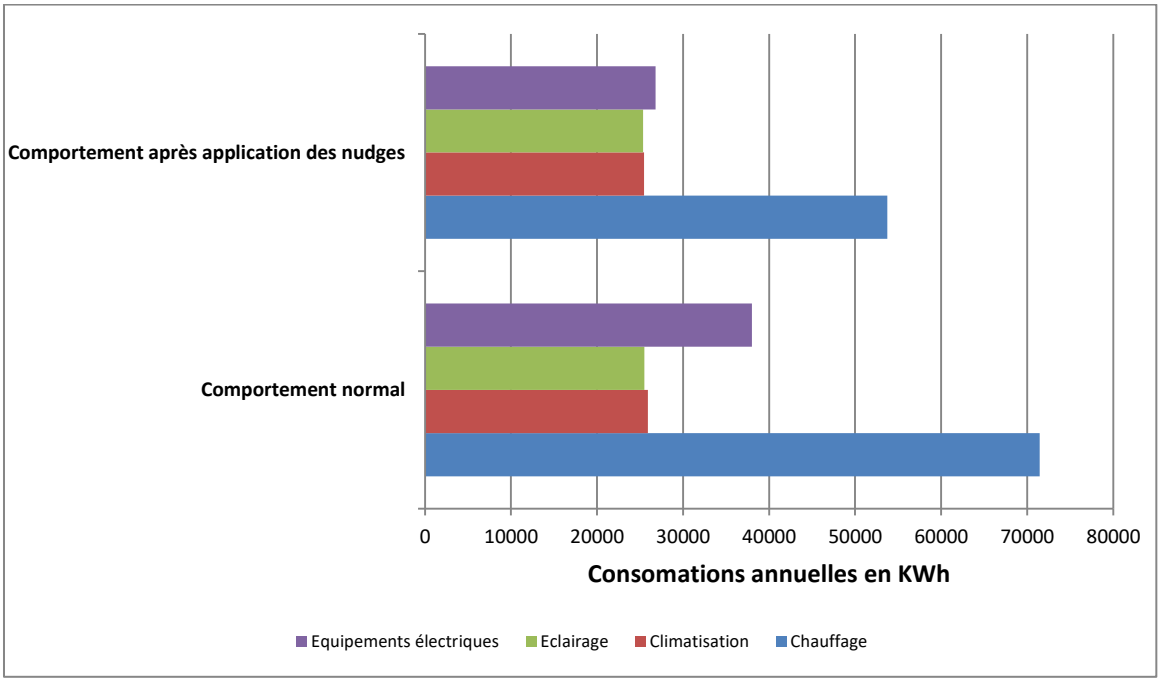


Figure 84: Réductions de consommations d'énergie simulées suite aux résultats des nudges sur une année

Les résultats obtenus (Figure 84) montrent des réductions importantes dans le chauffage (25 %). Des réductions importantes sont aussi notées dans le cas de l'usage des équipements (29 %). Ces réductions ont d'ailleurs été relevées pendant la période d'application des nudges et

quelques temps après aussi dans le cas de certains profils impliqués. Nous notons par ailleurs dans le cas de la climatisation une réduction de presque 2 %. Ce résultat est logique du moment que les consignes de climatisation n'ont pas été modifiées. La seule modification qui a pu impacter les consommations du système de climatisation est le taux d'ouverture de fenêtre au même moment que l'usage du chauffage ou de la climatisation. Nous avons en effet reproduit ce comportement aussi durant toute l'année. Finalement, les réductions des consommations du poste de l'éclairage n'ont pas dépassé les 1 %. Une explication possible est d'abord l'impact faible des comportements liés à l'éclairage compte tenu du fait que pas un grand changement a été effectué dans ce poste.

Pour ce qui est de la consommation totale, cette dernière a été réduite de 18 %. Nous avons donc une idée des réductions possibles durant toute l'année si une politique de réduction des consommations dans le bâtiment à travers ses occupants est adoptée. Bien entendu ces résultats ne sont pas garantis. Ils tiennent compte comme nous l'avons démontré auparavant de l'intention des occupants à changer de comportement et du degré de leur engagement.

La durabilité des résultats n'a pas été non plus étudiée de façon détaillée, mais nous considérons qu'une adaptation des nudges au fur et à mesure pourrait garantir la durabilité de l'impact positif des nudges. Il est important d'ailleurs de vérifier le retour des occupants qui ont participé à cette expérimentation par rapport à son efficacité, le niveau d'inconfort qu'elle a pu causer et la possibilité d'accepter ce genre d'interventions dans le futur. L'établissement d'un questionnaire Post Expérimentation a été nécessaire afin de vérifier tous ces éléments et bien d'autres.

6.4 *Questionnaire Post Expérimentation*

Après avoir étudié l'impact chiffré en termes de consommations d'énergie des nudges choisis dans l'expérimentation, nous nous intéressons maintenant à l'avis des participants de façon à vérifier les hypothèses d'efficacité des nudges et des outils de communication de ces nudges. Nous avons pour cela envoyé à l'ensemble des participants un questionnaire post expérimentation (voir Annexe 3 : Questionnaire Post Expérimentation qui va permettre de répondre aux éléments suivants :

- L'efficacité des informations reçues
- L'utilité des Stickers par rapport à des messages écrits
- Le format le plus adapté (Images, messages écrits, graphiques)
- L'efficacité des nudges dans le bureau
- L'efficacité des nudges au domicile
- La vérification du maintien du confort de l'occupant tout au long de l'expérimentation
- L'évaluation du moyen de communication : la plateforme
- L'évaluation de l'état actuel de connaissance des éco-gestes
- L'évaluation du niveau d'application des éco-gestes

Sur les 11 participants, nous avons recueilli 5 réponses.

La totalité des réponses affirme que les informations reçues et l'usage des stickers lors de l'expérimentation étaient très efficaces. Les stickers ont aussi un impact positif sur les visiteurs des bureaux où ils ont été collés. La totalité des réponses accorde une note de 4 sur une échelle de 5 sur l'impact de l'expérience sur la réduction des consommations d'énergie dans le bureau. En ce qui concerne le maintien du confort des occupants tout au long de l'expérimentation, la totalité des réponses a affirmé que la mise en place de l'expérimentation et l'envoi des messages n'ont causé ni inconfort, ni dérangement, ni perte de temps chez les participants. Les réponses

évaluent dans leur totalité positivement l'outil de communication (la plateforme utilisée pour envoyer les nudges aux participants).

Pour ce qui est de l'adoption des éco-gestes après l'application des nudges, nous effectuons une comparaison entre les réponses des participants avant et après l'application des nudges. Nous disposons de 4 réponses à présenter au vu de la présence d'une réponse anonyme. Elles sont notées sur une échelle de 1 à 5 :

Éteindre l'éclairage à chaque fois l'occupant quitte le bureau pour plus de 10 min	Favoriser l'éclairage naturel	Privilégier les vêtements chauds et réduire les consignes de chauffage	Débrancher les équipements électriques en quittant le bureau	Éteindre l'ordinateur en quittant le bureau
	4 -> 4	2 -> 4	4 -> 2	
4 -> 5	1 -> 1	4 -> 4	1 -> 2	1 -> 1
4 -> 5	4 -> 2	2 -> 4	2 -> 4	
4 -> 5		4 -> 4	1 -> 2	

Tableau 45 : Comparaison des réponses sur l'adoption des écogestes entre le questionnaire avant l'expérimentation et le questionnaire post expérimentation

Nous avons en général une majorité d'amélioration d'adoption des éco-gestes. Certains éco-gestes sont plus faciles à adopter que d'autres.

7 *Discussion et conclusion du chapitre*

7.1 *Discussion*

Dans la continuité du chapitre III dans lequel nous avons présenté le rôle des capteurs et du questionnaire dans la réalisation des simulations thermiques dynamiques afin d'évaluer l'impact du changement de comportement sur la réduction des consommations énergétiques dans le bâtiment, ce chapitre IV représente la partie expérimentale du changement de comportement et son impact dans le cadre de notre approche. Plus précisément, les capteurs connectés ont ici été utilisés dans un second objectif qui est d'assurer un suivi des consommations des occupants, envoyer un feedback aux occupants et finalement, évaluer l'efficacité des nudges utilisés.

Le questionnaire avait lui aussi un double objectif. En plus de fournir les données afin de générer les scénarios des occupants comme présenté dans le chapitre III, il est utilisé ici pour le profilage des occupants suivant leur intention de changer de comportement. L'importance de la création des profils des occupants est de permettre que l'étude de l'impact des nudges soit basée sur différents profils et non sur une étude générale comme ce qui est effectué dans les autres travaux. En effet, suivant leur intention de changer leur comportement et certains facteurs basés sur des théories comportementales, l'impact des nudges est différent. Cette approche présente l'avantage de comprendre les profils des occupants et d'adapter les solutions de nudges à chaque profil. Cela permet aussi d'avoir au préalable une idée sur les profils qui ont tendance à changer plus facilement de comportement et ceux pour lesquels plus d'effort doit être mobilisé. Ainsi, toute politique de réductions de consommations d'énergie dans le bâtiment à travers ses occupants peut être davantage orientée et adaptée. Le travail effectué sur la structure du questionnaire, la formulation des questions pour lever toute confusion et l'utilisation d'une

présentation agréable pour le participant facilitant de répondre aux questions ; représentent les points fort du questionnaire. Son double objectif représente aussi une valeur ajoutée dans le cadre de notre travail.

Finalement, le dernier pilier de notre étude est l'utilisation des nudges, un concept de l'économie comportementale. L'objectif de notre approche est d'étudier l'impact des nudges sur les différents profils des occupants. Pour cela, nous avons établi des hypothèses sur les nudges qui peuvent avoir plus d'impact sur chaque profil d'occupants suivant ses motivations et ses caractéristiques. Nous avons testé l'impact de ces nudges sur une durée de 12 semaines en changeant le type de nudges à chaque fois afin d'évaluer son impact. Les types de nudges se sont basés sur une classification que nous avons établie à partir des travaux issus de la littérature. Ce travail a l'avantage de présenter une étude des hypothèses des nudges à appliquer à chaque profil suivant ses caractéristiques et les réductions de consommations obtenues. L'étude de l'impact des nudges a été effectuée à travers les consommations journalières et hebdomadaires mais aussi à travers le nombre d'écogestes de plus en plus adoptés par les occupants. Notre approche présente l'avantage de s'être basée sur une plateforme qui peut être réutilisée dans d'autres travaux, et qui permet de choisir le type de nudges à envoyer suivant le profil. Elle permet aussi de vérifier si l'occupant a consulté ou non la page contenant le nudge. Nous avons conclu à travers cette étude que les profils avec une intention préalable de réduction des consommations sont les plus prêts à réduire leurs consommations d'énergie suite à l'application des nudges. D'un autre côté, les hypothèses établies sur les nudges ont montré que certains types de nudges sont plus adéquats à des profils que d'autres. Cette comparaison entre type de nudge et profil est absente dans la littérature. Cependant, il convient de noter que ce travail, réalisé avec seulement 10 participants, ne fournit que des tendances sur les gains d'énergie possibles à travers l'utilisation des nudges. Le nombre limité de représentants de chaque profil rend difficile de trancher sur le lien entre les nudges choisis et les profils. Néanmoins, cette étude représente un premier pas dans ce type d'études.

Pour résumer, l'approche que nous avons adoptée dans le cadre de notre étude s'est voulue globale et générale impliquant plusieurs volets liés à l'utilisation des nudges comme moyen de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment. Il est vrai que l'échantillon étudié est de petite taille (51 personnes), ce qui rend difficile tout travail de généralisation, mais cela permet d'établir un framework d'étude à appliquer dans des travaux futurs, avec tous les outils nécessaires pour le faire.

7.2 *Conclusion du chapitre*

Dans ce chapitre et le précédent, nous avons présenté une approche pluridisciplinaire permettant à travers une collecte de données par capteurs et par questionnaire, d'estimer le potentiel d'économie d'énergie due à un changement de comportement des occupants obtenu à travers des méthodes issues de l'économie comportementale nommées nudges.

Si le chapitre III s'est intéressé à estimer le potentiel de gains d'énergie à travers une multitude de simulations thermiques dynamiques, le présent chapitre a proposé une méthode de changement de comportement basée sur l'utilisation des nudges.

Le nudge, concept issu de l'économie comportementale, permet de changer les comportements

avec un coût faible et sans nuire à la liberté et au confort des utilisateurs, ce qui concorde avec les objectifs d'efficacité énergétique des bâtiments. Afin de définir les nudges les plus adaptés pour les différents occupants du bâtiment, nous effectuons une étude comportementale basée sur un questionnaire qui s'intéresse aux caractéristiques des occupants, leurs intentions, motivations et perceptions. Ce travail a permis de dégager cinq profils d'occupants pour lesquels nous avons établi des hypothèses de nudges à appliquer. Une étude expérimentale a permis de valider les nudges qui ont eu plus d'impact sur les occupants et de pouvoir estimer les réductions de consommations d'énergie dues à leur application sur d'autres occupants dans d'autres bâtiments.

Les niveaux de comportement définis et les profils d'occupants déterminés permettent de mieux comprendre les facteurs dictant le comportement des occupants dans le bâtiment et de mieux déterminer les incitations à déployer afin d'atteindre un comportement économe en énergie. Cette étude permet aussi de mieux estimer l'impact du changement de comportement dans les bâtiments par simulation thermique dynamique. Pour valider le cadre, celui-ci a été appliqué à une étude de cas d'un bâtiment en France et les résultats simulés ont été comparés aux résultats mesurés précédemment. Les résultats obtenus ont montré une réduction des consommations d'énergie due à un choix plus pertinent de nudges à appliquer pour chaque profil.

Cette étude pourrait apporter des éclaircissements sur les solutions pratiques envisageables pour engager l'occupant dans la réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment, avec une possibilité d'estimer ces gains en énergie. Ces résultats peuvent ainsi fournir des pistes de réflexion initiales, mais des études plus approfondies avec des échantillons plus larges seraient nécessaires pour confirmer et généraliser ces conclusions.

Conclusion générale

Bilan du travail effectué

Le secteur du bâtiment représente un gisement important de réduction des consommations d'énergie dans le monde, mais aussi en France où il est en effet le secteur le plus consommateur d'énergie. L'évolution du cadre réglementaire et des mesures prises au niveau de l'efficacité énergétique des bâtiments a certes permis de réduire les consommations d'énergie du chauffage mais ce dernier demeure le premier poste de consommation dans le résidentiel et dans le tertiaire. Les consommations d'autres postes comme l'électricité spécifique et l'eau chaude sanitaire sont pour leur part en continuelle augmentation. L'objectif des solutions d'efficacité énergétique est d'améliorer la performance énergétique du bâtiment en réduisant ses consommations tout en garantissant le confort de ses occupants. Pour autant, les travaux qui se sont intéressés au bâtiment lors de sa phase d'occupation ont mis en évidence l'impact du comportement de ses occupants sur les consommations d'énergie en dépit des mesures prises lors de la phase de conception. Cela s'explique par les interactions entre l'occupant et les systèmes du bâtiment (systèmes HVAC, ouvertures, systèmes d'occultation, équipements, etc.) qui peuvent conduire à un écart entre les consommations estimées et les consommations réelles. La simulation thermique dynamique est alors un outil utilisé afin de calculer sur une période de temps le comportement thermique d'un bâtiment. Les travaux de modélisation du comportement et son intégration dans les simulations thermiques dynamiques ont pour but de réduire cet écart mais cela peut aussi être atteint en éduquant les occupants afin qu'ils adoptent des comportements qui se rapprochent de ceux considérés dans la phase de conception.

Au vu de cet objectif, nous avons proposé dans le cadre de ce travail de thèse une approche comportementale basée à la fois sur les théories du comportement mais aussi sur l'usage de capteurs connectés et de la simulation thermique dynamique afin d'estimer les réductions d'énergie possibles à travers un changement de comportement.

Un premier objectif était d'abord de comprendre le comportement de l'occupant dans le bâtiment et le mesurer. Le deuxième objectif était de simuler les changements de comportements et les écogestes adoptées dans le bâtiment. Et finalement, un dernier objectif consistait à sensibiliser les occupants afin qu'ils adoptent le maximum d'écogestes.

Afin de mettre en pratique cette approche, nous avons développer une expérimentation dans un bâtiment de bureaux situé à Sophia Antipolis en France. Nous avons commencé par créer un questionnaire permettant de comprendre les intentions et les motivations des différents occupants du bâtiment, mais aussi de recenser leurs actions vis-à-vis de l'usage des différents systèmes du bâtiment. Ce questionnaire visait un double objectif, dont le premier consistait en une classification des occupants suivant leurs intentions de changement de comportement, leurs motivations et les facteurs pouvant bloquer le passage à l'action. Nous nous sommes basés pour cela sur un framework que nous avons développé à partir des théories du comportement les plus communément utilisées dans la littérature. Cette classification a permis de faire ressortir cinq profils de comportements avec des caractéristiques différentes. Le deuxième objectif de la mise en place d'un questionnaire fut de créer des scénarios de comportement à partir des informations communiquées par les occupants concernant leur usage de l'énergie dans le

bâtiment. Ces scénarios ont par la suite été importés dans le logiciel de simulation thermique dynamique Pleiades – Comfie afin de simuler les consommations annuelles du bâtiment à partir des informations relatées par les occupants.

En parallèle à la mise en place du questionnaire, notre travail s'est porté sur l'utilisation de capteurs connectés installés dans certains bureaux du bâtiment afin de collecter les données de consommations des différents équipements électriques. Nous nous sommes aussi basés sur les données de la GTB du bâtiment afin de connaitre les consignes de températures de chaque bureau et les heures d'ouverture et de fermeture des fenêtres. Comme dans le cas du questionnaire, ces données ont permis de générer des scénarios d'usage dans le bâtiment que nous avons intégrés dans le modèle de simulation thermique dynamique. Nous avons ensuite comparé les consommations annuelles simulées à partir de ces données de capteurs, à celles issues du questionnaire et celles basées sur les consignes normatives et des modèles préétablis. Cette comparaison a permis de confirmer l'importance de tenir compte du comportement des occupants dans les simulations thermiques dynamiques. La détermination du bon planning d'occupation et la définition des consignes de chauffage réelles par exemple permettent de se rapprocher davantage des consommations réelles. Nous nous sommes aussi basés sur cette étude afin de définir le cas de base sur lequel nous proposons des améliorations de comportement.

La partie simulation thermique dynamique concerne l'évaluation théorique de l'impact d'une adoption totale ou partielle de différents écogestes que nous proposons dans les bureaux du bâtiment étudié. En se basant sur les perspectives d'autres travaux, nous avons étudié le maximum d'écogestes relevés de la littérature et qui concernent : l'usage du chauffage et de la climatisation, l'éclairage, l'ouverture et fermeture des fenêtres, l'ouverture et fermeture des systèmes d'occultation, et les équipements électriques. D'après le questionnaire, les comportements menant à une surconsommation d'énergie sont effectués de façon équivalente pour les différents systèmes. Cependant, la simulation thermique dynamique a montré que leur impact est différent. Les écogestes liés à la baisse des consignes de chauffage par exemple ont plus d'impact que les autres écogestes. Pour l'éclairage, favoriser l'éclairage naturel est le comportement permettant le plus d'économies d'énergie et le rafraichissement nocturne permet beaucoup plus d'économies d'énergie que d'autres écogestes en ce qui concerne les systèmes de climatisation. Cependant, les autres gestes même avec un impact plus faible doivent être encouragés afin d'atteindre le maximum de réductions de consommation d'énergie.

La combinaison de tous les écogestes des différents systèmes d'usage d'énergie dans le bâtiment permettent, dans le cas des équipements électriques des réductions de 40 %, dans ceux de l'éclairage de 83 %, pour la climatisation de 28 % et enfin de 62 % dans le cas du chauffage. Ces valeurs demeurent cependant théoriques vu qu'elles représentent un cas où tous les occupants sont engagés de façon quotidienne durant toute l'année.

Dans le cas particulier du bâtiment étudié, nous avons défini quatre niveaux de comportements différents (du niveau 0 au niveau 3 ; le niveau 0 étant le plus consommateur) pour les postes de consommation : chauffage, climatisation, éclairage et équipements électriques. Ces différents niveaux ont été établis à partir des réponses des occupants au questionnaire suivant l'occurrence de certains comportements par rapport à d'autres. L'étude de l'impact des différents niveaux de comportements suivant leurs différentes répartitions par rapport aux occupants, a permis de définir les écogestes qu'il faut encourager plus afin de réduire les

consommations d'énergie dans le bâtiment. Ceci est important quand une démarche de changement de comportement est mise en place, et en particulier dans le cas d'un bâtiment où les occupants ne paient pas la facture énergétique. La consommation du bâtiment sujet de l'étude correspond à un niveau 1 de consommations. Un passage au niveau 2 pourrait garantir 40 % de réductions de consommations à condition d'une implication totale de la part des occupants.

Finalement, en ce qui concerne les outils de changement de comportement, nous avons utilisé dans le cadre de notre étude les nudges comme moyen de changement de comportement. Des solutions peu coûteuses et qui permettent de contourner les biais cognitifs des individus afin de les amener à adopter le comportement souhaité. Afin de définir les nudges les plus adaptés pour chaque participant, nous nous sommes basés sur des hypothèses liées à son profil suivant ses caractéristiques, les blocages au passage à l'action et les préférences par rapport aux incitations (à partir du questionnaire). Nous avons mis en place une plateforme permettant d'envoyer les nudges adéquats pour chaque participant tout au long de l'expérimentation. Cette dernière s'est organisée sur une durée totale de 12 semaines, dont trois semaines avant et trois après, et six semaines d'envoi de nudges. Il ressort de cette étude comportementale les résultats suivants :

- L'impact des nudges varie d'un profil à un autre suivant son intention initiale de changer de comportement. Les nudges ont permis jusqu'à 60 % de réductions dans le cadre de l'usage des équipements électriques. Ils restent cependant plus efficaces pour les profils impliqués que pour les profils avec des blocages ou moins impliqués.
- La prise en considération des préférences des individus par rapport à l'outil de communication et le type de nudges à appliquer assure plus ou moins d'efficacité.
- Pour les profils plus impliqués, l'effet du nudge se poursuit même après la fin de la phase de leur application. Pour ce qui est des profils moins impliqués ou présentant des blocages, cet impact s'arrête avec la fin des nudges. Il est donc important de connaitre le profil de l'occupant afin de mieux le cibler.
- La généralisation des résultats de l'application des nudges sur une durée d'une année a conduit à des résultats de 18 %. La plus grande part de ces réductions est enregistrée au niveau du chauffage et de l'usage des équipements électriques.

Il se dégage de cette étude qu'une meilleure connaissance des occupants permet une meilleure gestion de leurs consommations. La prise en considération de certains facteurs comportementaux permet de mieux guider une démarche de réduction de consommations dans le bâtiment à travers l'occupant. Il est vrai que les nudges qui ont l'avantage d'être des solutions peu coûteuses ne représentent pas une solution qui remplacera des travaux importants de rénovation mais il s'agit d'une approche importante et complémentaire qui s'inscrit dans un objectif global d'efficacité énergétique pouvant accompagner le bâtiment tout au long de sa phase d'exploitation afin d'assurer la sobriété énergétique.

Perspectives

Notre travail s'inscrit dans le contexte d'une nécessité d'impliquer les occupants à travers des comportements vertueux afin d'assurer des réductions de consommation d'énergie dans le bâtiment. Cette approche peut représenter une solution en soi, ou être menée en parallèle avec

un programme global d'efficacité énergétique impliquant des réglementations et des dispositifs mis en place par l'Etat pour les bâtiments tertiaires et résidentiels.

Le travail réalisé présente cependant des voies d'amélioration qui peuvent être investiguées dans de futurs travaux ; dans un premier temps, dans d'autres bâtiments tertiaires, ensuite dans des bâtiments résidentiels. Dans ce contexte, il est aussi possible d'étudier l'effet de débordement qui investigue l'impact des nudges appliqués dans l'environnement de travail sur leur comportement des occupants dans leurs logements. Il serait également intéressant de mener l'étude expérimentale sur d'autres bâtiments afin de vérifier les paramètres du profilage et les résultats de l'application des nudges sur les profils étudiés. En dehors des objectifs de cette thèse, l'étude de l'impact d'autres incitations émergentes telles que les boost est aussi intéressante à investiguer (Lazaric and Toumi, 2022).

L'étude de l'impact de l'utilisation des nudges dans d'autres secteurs que le bâtiment représente également une piste intéressante pour de futurs travaux de recherche. Des mesures incitatives susceptibles d'encourager les comportements pro-environnementaux doivent être développés, en particulier avec les outils technologiques actuels et le contexte du développement des « Smart Building » et de la « Smart City » (Gonçalves et al., 2020). Ces derniers exigent des critères d'innovation, de durabilité, de qualité environnementale, de biodiversité, d'éducation, de santé, tous tournant autour de l'usage des technologies de communication et de l'information (Akande et al., 2019 ; Allam and Dhunny, 2019).

Bibliographie

Abanda, F.H., Byers, L., 2016. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). Energy 97, 517–527. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135

ABDELLATIF, M., CHAMOIN, J., NIANGA, J.-M., DEFER, D., 2020. Prédiction par régression linéaire multiple : application au comportement thermique d'un bâtiment. Academic Journal of Civil Engineering 77-80 Pages. https://doi.org/10.26168/AJCE.38.1.19

Abrahamse, W., Steg, L., 2013. Social influence approaches to encourage resource conservation: A meta-analysis. Global Environmental Change 23, 1773–1785. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.07.029

Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., Rothengatter, T., 2005. A review of intervention studies aimed at household energy conservation. Journal of Environmental Psychology 25, 273–291. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2005.08.002

Adams, J.N., Bélafi, Z.D., Horváth, M., Kocsis, J.B., Csoknyai, T., 2021. How Smart Meter Data Analysis Can Support Understanding the Impact of Occupant Behavior on Building Energy Performance: A Comprehensive Review. Energies 14, 2502. https://doi.org/10.3390/en14092502

ADEME, 2020. Eco-responsable au bureau, Clés pour agir. ADEME.

ADEME, CODA STRATEGIES, 2021. La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiairesétat des Lieux 2020. ADEME, CODA STRATEGIES.

Aditya, L., Mahlia, T.M.I., Rismanchi, B., Ng, H.M., Hasan, M.H., Metselaar, H.S.C., Muraza, O., Aditiya, H.B., 2017. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 73, 1352–1365. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034

Agarwal, S., Rengarajan, S., Sing, T.F., Yang, Y., 2017. Nudges from school children and electricity conservation: Evidence from the "Project Carbon Zero" campaign in Singapore. Energy Economics 61, 29–41. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.10.014

Ahmad, M.W., Mourshed, M., Rezgui, Y., 2017. Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of building energy consumption. Energy and Buildings 147, 77–89. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.038

Ahmadi-Karvigh, S., Ghahramani, A., Becerik-Gerber, B., Soibelman, L., 2018. Real-time activity recognition for energy efficiency in buildings. Applied Energy 211, 146–160. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.055

Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W.-C., Tee, B.T., You, S., 2022. Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. Energy and Buildings 256, 111755. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111755

Ahn, K.U., Kim, D.W., Kim, Y.J., Yoon, S.H., Park, C.S., 2016. Issues to Be Solved for Energy Simulation of An Existing Office Building. Sustainability 8, 345. https://doi.org/10.3390/su8040345

Ajzen, I., 1985. From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior, in: Kuhl, J., Beckmann, J. (Eds.), Action Control: From Cognition to Behavior, SSSP Springer Series in Social Psychology. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 11–39. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69746-3_2

Akande, A., Cabral, P., Gomes, P., Casteleyn, S., 2019. The Lisbon ranking for smart sustainable cities in Europe. Sustainable Cities and Society 44, 475–487. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.009

Alaa Alfakara, Ben Croxford, 2014. Using agent-based modelling to simulate occupants' behaviours in response to summer overheating | Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design.

Al-Habaibeh, A., Sen, A., Chilton, J., 2021. Evaluation tool for the thermal performance of retrofitted buildings using an integrated approach of deep learning artificial neural networks and infrared thermography. Energy and Built Environment 2, 345–365. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.06.004

Alhagla, K., Mansour, A., Elbassuoni, R., 2019. Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving. Alexandria Engineering Journal 58, 283–290. https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.01.004

Allam, Z., Dhunny, Z.A., 2019. On big data, artificial intelligence and smart cities. Cities 89, 80–91. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.032

Amasyali, K., El-Gohary, N., 2021. Machine learning for occupant-behavior-sensitive cooling energy consumption prediction in office buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 142, 110714. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110714

Amiel, M., 2019. Mise en place d'une méthode de clustering pour la mise en évidence d'un potentiel d'économie d'énergie sur les bâtiments existants. Academic Journal of Civil Engineering 37, 44–51. https://doi.org/10.33557/ajce.37.1.9

Anand, P., Cheong, D., Sekhar, C., Santamouris, M., Kondepudi, S., 2019. Energy saving estimation for plug and lighting load using occupancy analysis. Renewable Energy 143, 1143–1161. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.089

Andersen, P.D., Iversen, A., Madsen, H., Rode, C., 2014. Dynamic modeling of presence of occupants using inhomogeneous Markov chains. Energy and Buildings 69, 213–223. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.001

Andor, M.A., Fels, K.M., 2018. Behavioral Economics and Energy Conservation – A Systematic Review of Non-price Interventions and Their Causal Effects. Ecological Economics 148, 178–210. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.018

Andrei, N.L., Tanasiev, V., Sava, G., Badea, A., 2018. IoT for Smart Residential Buildings, in: 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe). Presented at the 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe), pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494026

Andrews, C.J., H. Chandra Putra, C. Brennan, 2013. Simulation Modeling of Occupant Behavior in Commercial Buildings. Center for Green Building at Rutgers University for the Energy Efficient Buildings Hub, Philadelphia, PA.

Andrews, C.J., Yi, D., Krogmann, U., Senick, J.A., Wener, R.E., 2011. Designing Buildings for Real Occupants: An Agent-Based Approach. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans 41, 1077–1091. https://doi.org/10.1109/TSMCA.2011.2116116

Anvari-Moghaddam, A., Monsef, H., Rahimi-Kian, A., 2015. Optimal Smart Home Energy Management Considering Energy Saving and a Comfortable Lifestyle. IEEE Transactions on Smart Grid 6, 324–332. https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2349352

Aragon, V., Gauthier, S., Warren, P., James, P.A.B., Anderson, B., 2019. Developing English domestic occupancy profiles. Building Research & Information 47, 375–393. https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1399719

Ariely, D., 2010. Predictably irrational : the hidden forces that shape our decisions. First Harper Perennial edition. New York : Harper Perennial, 2010.

Arif Kamal, M., Bano, F., 2016. Examining the Role of Building Envelope for Energy Efficiency in Office Buildings in India Article Outline [WWW Document]. URL https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50912522/Examining_the_Role_of_Building_Envelope_for_Energy_Efficiency_in_Office_Buildings_in_India-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1654595892&Signature=YYFZLIJyBW2VCBUYGfczCsUZJv~rCbQYeOD19GpYL~LhJQdpwapRZ44jabTi6w7QYdpYHCDCkI2esRM~60HI5G~5t2TPH0CH0XQyLih~W~dTtvSu-PXRHe~dHIt1qx-oxAXYSmUkfGrY7i64eJFlt8j~YZkYS33ksUgWX6YIX34gyMY1a4JfoeMM1rvBXfwI8fiMOXPaDC~xJ-ser47srRerU7~~-OusXjuIHNqAbY0~Q5RulLDPrK0KUpLBaWcKfGIGPmOVq2OYZaHL-9eNHrTW5QI7Xgc1fozBxwMusxjJG-~NW~Q7hwc~W0giamxWg9WCKgIQuPM-yO6jnRx4Tw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA (accessed 6.7.22).

Arrêté relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants., 2007.

Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R.F., Mastellone, M., Mauro, G.M., Vanoli, G.P., 2020. The role of the occupant behavior in affecting the feasibility of energy refurbishment of residential buildings: Typical effective retrofits compromised by typical wrong habits. Energy and Buildings 223, 110217. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110217

Ascione, F., Borrelli, M., De Masi, R.F., de Rossi, F., Vanoli, G.P., 2019. A framework for NZEB design in Mediterranean climate: Design, building and set-up monitoring of a lab-small villa. Solar Energy 184, 11–29. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.083

Aste, N., Manfren, M., Marenzi, G., 2017. Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 75, 313–330. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.072

Azar, E., Al Ansari, H., 2017. Framework to investigate energy conservation motivation and actions of building occupants: The case of a green campus in Abu Dhabi, UAE. Applied Energy 190, 563–573. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.128

Azizi, Z.M., Mokhtar Azizi, N.S., Abidin, N.Z., Mannakkara, S., 2019. Making Sense of Energy-Saving Behaviour: A Theoretical Framework on Strategies for Behaviour Change Intervention. Procedia Computer Science, 3rd WORLD CONFERENCE ON TECHNOLOGY, INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP"INDUSTRY 4.0 FOCUSED INNOVATION, TECHNOLOGY, ENTREPRENEURSHIP AND MANUFACTURE" June 21-23, 2019 158, 725–734. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.108

Badeche, M., 2022. Integrated Adaptive Facades for Building Energy Efficiency and User's Thermal Comfort, in: Hatti, M. (Ed.), Artificial Intelligence and Heuristics for Smart Energy Efficiency in Smart Cities, Lecture Notes in Networks and Systems. Springer International Publishing, Cham, pp. 882–888. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92038-8_90

Bal, M., Stok, F.M., Van Hemel, C., De Wit, J.B.F., 2021. Including Social Housing Residents in the Energy Transition: A Mixed-Method Case Study on Residents' Beliefs, Attitudes, and Motivation Toward Sustainable Energy Use in a Zero-Energy Building Renovation in the Netherlands. Frontiers in Sustainable Cities 3.

Balvedi, B.F., Ghisi, E., Lamberts, R., 2018. A review of occupant behaviour in residential buildings. Energy and Buildings 174, 495–505. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049

Bamberg, S., Ajzen, I., Schmidt, P., 2003. Choice of Travel Mode in the Theory of Planned Behavior: The Roles of Past Behavior, Habit, and Reasoned Action. Basic and Applied Social Psychology 25, 175–187. https://doi.org/10.1207/S15324834BASP2503_01

Bano, F., Sehgal, V., 2018. Evaluation of energy-efficient design strategies: Comparison of the thermal performance of energy-efficient office buildings in composite climate, India. Solar Energy 176, 506–519. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.057

Bartak, M., Drkal, F., Hensen, J., Lain, M., Matuska, T., Schwarzer, J., Sourek, B., 2014. ESP-r: INTEGRATED SIMULATION TOOL FOR DESIGN OF BUILDINGS AND SYSTEMS 10.

Barthelmes, V.M., Li, R., Andersen, R.K., Bahnfleth, W., Corgnati, S.P., Rode, C., 2018. Profiling occupant behaviour in Danish dwellings using time use survey data. Energy and Buildings 177, 329–340. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.044

Bastida, L., Cohen, J.J., Kollmann, A., Moya, A., Reichl, J., 2019. Exploring the role of ICT on household behavioural energy efficiency to mitigate global warming. Renewable and Sustainable Energy Reviews 103, 455–462. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.004

Batier, C., 2015. De la simulation thermique dynamique à la simulation comportementale de l'occupant 9.

Bavaresco, M.V., D'Oca, S., Ghisi, E., Lamberts, R., 2019. Technological innovations to assess and include the human dimension in the building-performance loop: A review. Energy and Buildings 202, 109365. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109365

Becker, G.S., 1993. The economic way of looking at life.

Belaïd, F., Joumni, H., 2020. Behavioral attitudes towards energy saving: Empirical evidence from France. Energy Policy 140, 111406. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111406

Belaïd, F., Roubaud, D., Galariotis, E., 2019. Features of residential energy consumption: Evidence from France using an innovative multilevel modelling approach. Energy Policy 125, 277–285. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.007

Belazi, W., Ouldboukhitine, S.-E., Chateauneuf, A., Bouchair, A., 2022. Thermal modeling of the occupied multi-zone buildings taking into account the uncertainties of occupant behavior. Case Studies in Thermal Engineering 33, 101978. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101978

Belazi, W., Ouldboukhitine, S.-E., Chateauneuf, A., Bouchair, A., 2018. Uncertainty analysis of occupant behavior and building envelope materials in office building performance simulation. Journal of Building Engineering 19, 434–448. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.06.005

Bellavista, P., Giannelli, C., Zamagna, R., 2017. The PeRvasive Environment Sensing and Sharing Solution. Sustainability 9, 585. https://doi.org/10.3390/su9040585

Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., Salamone, F., Scamoni, F., Scrosati, C., 2019. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. Journal of Building Engineering 25, 100772. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100772

Benzi, F., Anglani, N., Bassi, E., Frosini, L., 2011. Electricity Smart Meters Interfacing the Households. IEEE Transactions on Industrial Electronics 58, 4487–4494. https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2107713

Bhamare, D.K., Rathod, M.K., Banerjee, J., 2019. Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. Energy and Buildings 198, 467–490. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023

Bin, S., 2012. Greening Work Styles: An Analysis of Energy Behavior Programs in the Workplace 46.

Binet, G., Grignon-Massé, L., 2020. La climatisation des logements résidentiels : laisser faire ou encadrer intelligemment ?

Bonte, M., 2014. Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment : modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Bottaccioli, L., Aliberti, A., Ugliotti, F., Patti, E., Osello, A., Macii, E., Acquaviva, A., 2017. Building Energy Modelling and Monitoring by Integration of IoT Devices and Building Information Models, in: 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). Presented at the 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), IEEE, Turin, Italy, pp. 914–922. https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2017.75

Boudier, K., Fiorentini, M., Hoffmann, S., Kalyanam, R., Kokogiannakis, G., 2016. Coupling a Thermal Comfort Model with Building Simulation for User Comfort and Energy Efficiency. Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part B.

Boudier, K., Hoffmann, S., 2019. Modeling Decentralized Systems For Energy Savings Based On Detailed Local Thermal Comfort Calculations. Presented at the Building Simulation 2019, Rome, Italy, pp. 2278–2285. https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210857

Bourgeois, A., Pellegrino, M., Lévy, J.-P., 2017. Modeling and mapping domestic energy behavior: Insights from a consumer survey in France. Energy Research & Social Science, Energy Consumption in Buildings: 32, 180–192. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.021

Brisepierre, G., Garabuau-Moussaoui, I., 2020. Etude qualitative sur la 1ère édition du concours d'économies d'énergie CUBE 2020 152.

Brosch, T., Patel, M., Sander, D., 2014. Affective Influences on Energy-Related Decisions and Behaviors. Frontiers in Energy Research 2, 11. https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00011

Calì, D., Matthes, P., Huchtemann, K., Streblow, R., Müller, D., 2015. CO2 based occupancy detection algorithm: Experimental analysis and validation for office and residential buildings. Building and Environment 86, 39–49. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.011

Carlucci, S., Causone, F., Biandrate, S., Ferrando, M., Moazami, A., Erba, S., 2021. On the impact of stochastic modeling of occupant behavior on the energy use of office buildings. Energy and Buildings 246, 111049. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111049

Carlucci, S., De Simone, M., Firth, S.K., Kjærgaard, M.B., Markovic, R., Rahaman, M.S., Annaqeeb, M.K., Biandrate, S., Das, A., Dziedzic, J.W., Fajilla, G., Favero, M., Ferrando, M., Hahn, J., Han, M., Peng, Y., Salim, F., Schlüter, A., van Treeck, C., 2020. Modeling occupant behavior in buildings. Building and Environment 174, 106768. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106768

Carmenate, T., Inyim, P., Pachekar, N., Chauhan, G., Bobadilla, L., Batouli, M., Mostafavi, A., 2016. Modeling Occupant-Building-Appliance Interaction for Energy Waste Analysis. Procedia Engineering 145, 42–49. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.012

Casado-Mansilla, D., Moschos, I., Kamara-Esteban, O., Tsolakis, A.C., Borges, C.E., Krinidis, S., Irizar-Arrieta, A., Konstantinos, K., Pijoan, A., Tzovaras, D., LóPez-De-IpiñA, D., 2018. A Human-Centric Context-Aware IoT Framework for Enhancing Energy Efficiency in Buildings of Public Use. IEEE Access 6, 31444–31456. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2837141

Casado-Mansilla, D., Tsolakis, A.C., Borges, C.E., Kamara-Esteban, O., Krinidis, S., Avila, J.M., Tzovaras, D., López-de-Ipiña, D., 2020. Socio-Economic Effect on ICT-Based Persuasive Interventions Towards Energy Efficiency in Tertiary Buildings. Energies 13, 1700. https://doi.org/10.3390/en13071700

Castaldo, V.L., Pisello, A.L., 2018. Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: a review. WIREs Energy and Environment 7, e269. https://doi.org/10.1002/wene.269

Causone, F., Pietrobon, M., Pagliano, L., Erba, S., 2017. A high performance home in the Mediterranean climate: from the design principle to actual measurements. Energy Procedia, Beyond NZEB Buildings (AiCARR 50th International Congress, Matera (I), 10-11 May 2017) 140, 67–79. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.124

Chammat, M., Giraud, S., Lakhlifi, C., Mus, M., Rozier, C., Vagharchakian, L., 2019. Auteurs : Zahra-Jeanne BOUDALAOUI-BURESI, Paul GRIGNON, Camille LAKHLIFI, Mathilde MUS 44.

Chapman, J., 2017. Multi-Agent Stochastic Simulation of Occupants in Buildings.

Charlier, C., Guerassimoff, G., Kirakosian, A., Selosse, S., 2018. Under pressure! Nudging electricity consumption within firms. Feedback from a field experiment, in: IEW - International Energy Workshop. Gothenburg, Sweden.

Charlot-Valdieu, C., Outrequin, P., 2017. Bâtiments passifs tertiaires: concevoir, construire et réhabiliter. Éditions Le Moniteur, Antony.

Chaussinand, A., Scartezzini, J.L., Nik, V., 2015. Straw bale: A Waste from Agriculture, a New Construction Material for Sustainable Buildings. Energy Procedia, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 297–302. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.646

Chen, C., Xu, X., Day, J.K., 2017. Thermal comfort or money saving? Exploring intentions to conserve energy among low-income households in the United States. Energy Research & Social Science 26, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.009

Chen, M.-F., Tung, P.-J., 2014. Developing an extended Theory of Planned Behavior model to predict consumers' intention to visit green hotels. International Journal of Hospitality Management 36, 221–230. https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2013.09.006

Chen, S., Yang, W., Yoshino, H., Levine, M.D., Newhouse, K., Hinge, A., 2015. Definition of occupant behavior in residential buildings and its application to behavior analysis in case studies. Energy and Buildings 104, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.075

Chen, S., Zhang, G., Xia, X., Setunge, S., Shi, L., 2020. A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings. Energy and Buildings 216, 109944. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109944

Chen, X., Gou, Z., 2022. Bridging the knowledge gap between energy-saving intentions and behaviours of young people in residential buildings. Journal of Building Engineering 57, 104932. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104932

Chen, Y., Hong, T., Luo, X., 2018. An agent-based stochastic Occupancy Simulator. Build. Simul. 11, 37–49. https://doi.org/10.1007/s12273-017-0379-7

Chen, Z., Xu, J., Soh, Y.C., 2015. Modeling regular occupancy in commercial buildings using stochastic models. Energy and Buildings 103, 216–223. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.009

Chenailler, H., 2012. L'efficacité d'usage énergétique: pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments.

Chiffres clés de l'énergie, 2022. . CGDD.

Chiu, L.F., Lowe, R., Raslan, R., Altamirano-Medina, H., Wingfield, J., 2014. A socio-technical approach to post-occupancy evaluation: interactive adaptability in domestic retrofit. Building Research & Information 42, 574–590. https://doi.org/10.1080/09613218.2014.912539

Chobanov, V., Bojkov, K., 2021. Evaluation of Economic and Social Effects of Integrating a BMS System in Residential and Commercial Housing, in: 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). Presented at the 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), pp. 74–77. https://doi.org/10.1109/ISMSIT52890.2021.9604703

Chouikh, S.G.G., 2013. Interopérabilité sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des sytèmes de bâtiment.

Conradie, P., Van Hove, S., Pelka, S., Karaliopoulos, M., Anagnostopoulos, F., Brugger, H., Ponnet, K., 2023. Why do people turn down the heat? Applying behavioural theories to assess reductions in space heating and energy consumption in Europe. Energy Research & Social Science 100, 103059. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103059

Conseil national du débat, 2013. Synthèse du débat national sur la transition énergétique. Secrétariat général du débat national sur la transition énergétique.

COSTIC, 2020. Vers une meilleure connaissance des besoins en eau chaude sanitaire en tertiaire. COSTIC.

Coulbaut-Lazzarini, A., Bailly, G., 2015. People in Smart Buildings: Daily Practices in Automated Areas, in: Helfert, M., Krempels, K.-H., Klein, C., Donellan, B., Guiskhin, O. (Eds.), Smart Cities, Green Technologies, and Intelligent Transport Systems, Communications in Computer and Information Science. Springer International Publishing, Cham, pp. 104–127. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27753-0_6

Cowie, A., 2017. Usefulness of the obFMU Module Examined through a Review of Occupant Modelling Functionality in Building Performance Simulation Programs. Presented at the 2017 Building Simulation Conference. https://doi.org/10.26868/25222708.2017.504

da Cunha, S.R.L., de Aguiar, J.L.B., 2020. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. Journal of Energy Storage 27, 101083. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083

Dahanayake, K.W.D.K.C., Chow, C.L., 2017. Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. Energy and Buildings 138, 47–59. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.002

Dai, X., Liu, J., Zhang, X., 2020. A review of studies applying machine learning models to predict occupancy and window-opening behaviours in smart buildings. Energy and Buildings 223, 110159. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110159

Darakdjian, Q., 2017. Prédiction des performances énergétiques des bâtiments avec prise en compte du comportement des usagers.

Darakdjian, Q., Billé, S., Inard, C., 2018a. Data mining of building performance simulations comprising occupant behaviour modelling. Advances in Building Energy Research 13, 157–173. https://doi.org/10.1080/17512549.2017.1421099

Darakdjian, Q., Billé, S., Inard, C., 2018b. Data mining of building performance simulations comprising occupant behaviour modelling. Advances in Building Energy Research 13, 157–173. https://doi.org/10.1080/17512549.2017.1421099

Davis, L.W., Martinez, S., Taboada, B., 2020. How effective is energy-efficient housing? Evidence from a field trial in Mexico. Journal of Development Economics 143, 102390. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2019.102390

Day, J., Theodorson, J., Van Den Wymelenberg, K., 2012. Understanding Controls, Behaviors and Satisfaction in the Daylit Perimeter Office: A Daylight Design Case Study. Journal of Interior Design 37, 17–34. https://doi.org/10.1111/j.1939-1668.2011.01068.x

Day, J.K., O'Brien, W., 2017. Oh behave! Survey stories and lessons learned from building occupants in high-performance buildings. Energy Research & Social Science, Narratives and Storytelling in Energy and Climate Change Research 31, 11–20. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.037

De Groot, J., Steg, L., 2007. General Beliefs and the Theory of Planned Behavior: The Role of Environmental Concerns in the TPB. Journal of Applied Social Psychology 37, 1817–1836. https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.2007.00239.x

de Leeuw, A., Valois, P., Ajzen, I., Schmidt, P., 2015. Using the theory of planned behavior to identify key beliefs underlying pro-environmental behavior in high-school students: Implications for educational interventions. Journal of Environmental Psychology 42, 128–138. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.03.005

De Paola, A., Ortolani, M., Lo Re, G., Anastasi, G., Das, S.K., 2014. Intelligent Management Systems for Energy Efficiency in Buildings: A Survey. ACM Comput. Surv. 47, 13:1-13:38. https://doi.org/10.1145/2611779

Decruz, A., 2016. Development and integration of a green roof model within whole building energy simulation [WWW Document]. URL http://eprints.nottingham.ac.uk/32544/ (accessed 10.17.22).

Dejous, C., Alquier, B., Ferré, G., Hirsch, L., Salotti, J.-M., Villesuzanne, P., Zimmer, T., 2021. Concours CUBE2020 et réduction de l'impact environnemental du laboratoire IMS 7.

Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., Zhou, Y., 2017. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 80, 1061–1071. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264

Deme Belafi, Z., Hong, T., Reith, A., 2018. A critical review on questionnaire surveys in the field of energy-related occupant behaviour. Energy Efficiency 11, 2157–2177. https://doi.org/10.1007/s12053-018-9711-z

Deng, S., Wang, R.Z., Dai, Y.J., 2014. How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research. Energy 71, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.007

Dexeus, C., 2014. Cost-benefit analyses & state of play of smart metering deployment in the EU-27.

Dietz, T., Gardner, G.T., Gilligan, J., Stern, P.C., Vandenbergh, M.P., 2009. Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 106, 18452–18456. https://doi.org/10.1073/pnas.0908738106

Ding, Z.H., Li, Y.Q., Zhao, C., Liu, Y., Li, R., 2019. Factors affecting heating energy-saving behavior of residents in hot summer and cold winter regions. Nat Hazards 95, 193–206. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3489-3

Directive 2010/31/UE, 2010. Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments, 153.

Dixon, G.N., Deline, M.B., McComas, K., Chambliss, L., Hoffmann, M., 2015. Saving energy at the workplace: The salience of behavioral antecedents and sense of community. Energy Research & Social Science 6, 121–127. https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.01.004

D'Oca, S., Hong, T., 2015. Occupancy schedules learning process through a data mining framework. Energy and Buildings 88, 395–408. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.065

D'Oca, S., Pisello, A.L., De Simone, M., Barthelmes, V.M., Hong, T., Corgnati, S.P., 2018. Human-building interaction at work: Findings from an interdisciplinary cross-country survey in Italy. Building and Environment 132, 147–159. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.039

Dols, W.S., Emmerich, S.J., Polidoro, B.J., 2016. Using Coupled Energy, Airflow and IAQ Software (TRNSYS/CONTAM) to Evaluate Building Ventilation Strategies. Build Serv Eng Res Technol 37, 163–175. https://doi.org/10.1177/0143624415619464

Donges, J., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A., 2021. Impact of occupant behavior on performance optimized building retrofits. Presented at the 2021 Building Simulation Conference. https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30965

Du, J., Pan, W., 2021. Diverse occupant behaviors and energy conservation opportunities for university student residences in Hong Kong. Building and Environment 195, 107730. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107730

Du, J., Pan, W., Yu, C., 2020. In-situ monitoring of occupant behavior in residential buildings – a timely review. Energy and Buildings 212, 109811. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109811

Dufour, L., 2017. Contribution à la mise au point d'un pilotage énergétique décentralisé par prédiction (thesis). Ecole nationale des Mines d'Albi-Carmaux.

Dupont, F., 2018. L'énergie et le bâtiment : les données chiffrées pour la France depuis 1950. Annales des Mines - Responsabilité et environnement 90, 5–11. https://doi.org/10.3917/re1.090.0005

Džiugaitė-Tumėnienė, R., Mikučionienė, R., Streckienė, G., Bielskus, J., 2021. Development and Analysis of a Dynamic Energy Model of an Office Using a Building Management System (BMS) and Actual Measurement Data. Energies 14, 6419. https://doi.org/10.3390/en14196419

Ebuy, H.T., El-Haouzi, H.B., Pannequin, R., Benelmir, R., 2021. Multi-agent simulation of occupant behavior impact on building energy consumption 13.

Eguaras-Martínez, M., Vidaurre-Arbizu, M., Martín-Gómez, C., 2014. Simulation and evaluation of Building Information Modeling in a real pilot site. Applied Energy 114, 475–484. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.047

Eicker, U., Demir, E., Gürlich, D., 2015. Strategies for cost efficient refurbishment and solar energy integration in European Case Study buildings. Energy and Buildings 102, 237–249. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.032

Elster, J., 1986. Rational Choice: Readings in Social and Political Theory. Basil Blackwell.

Enongene, K.E., Murray, P., Holland, J., Abanda, F.H., 2017. Energy savings and economic benefits of transition towards efficient lighting in residential buildings in Cameroon. Renewable and Sustainable Energy Reviews 78, 731–742. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.068

Ertz, M., Karakas, F., Sarigöllü, E., 2016. Exploring pro-environmental behaviors of consumers: An analysis of contextual factors, attitude, and behaviors. Journal of Business Research 69, 3971–3980. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.06.010

European Comission, 2022. Smart Metering deployment in the European Union | JRC Smart Electricity Systems and Interoperability [WWW Document]. URL https://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-metering-deployment-european-union (accessed 6.8.22).

Fabi, V., Andersen, R.K., Corgnati, S.P., Venezia, F., 2012. Influence of User Behaviour on Indoor Environmental Quality and Heating Energy Consumptions in Danish Dwellings. Presented at the 2nd International Conference on Building Energy and Environment.

Farrow, K., Grolleau, G., Ibanez, L., 2017. Social Norms and Pro-environmental Behavior: A Review of the Evidence. Ecological Economics 140, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.017

Farzaneh, H., Malehmirchegini, L., Bejan, A., Afolabi, T., Mulumba, A., Daka, P.P., 2021. Artificial Intelligence Evolution in Smart Buildings for Energy Efficiency. Applied Sciences 11, 763. https://doi.org/10.3390/app11020763

Fielding, K.S., Russell, S., Spinks, A., Mankad, A., 2012. Determinants of household water conservation: The role of demographic, infrastructure, behavior, and psychosocial variables. Water Resources Research 48. https://doi.org/10.1029/2012WR012398

FLÜRY-HÉRARD, B., DUFAY, J.-P., 2017. Le déploiement du compteur Linky.

Fotopoulou, E., Zafeiropoulos, A., Terroso-Sáenz, F., Şimşek, U., González-Vidal, A., Tsiolis, G., Gouvas, P., Liapis, P., Fensel, A., Skarmeta, A., 2017. Providing Personalized Energy Management and Awareness Services for Energy Efficiency in Smart Buildings. Sensors 17, 2054. https://doi.org/10.3390/s17092054

Friess, W.A., Rakhshan, K., 2017. A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. Renewable and Sustainable Energy Reviews 72, 485–496. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.026

Frossard, M., Peuportier, B., Schalbart, P., 2018. Optimisation multicritère et analyse de cycle de vie de bâtiments zéro-énergie, in: IBPSA France: Conférence Francophone de l'International Building Performance. Bordeaux, France.

Gaitan, N.C., Ungurean, I., Roman, C., Francu, C., 2022. An Optimizing Heat Consumption System Based on BMS. Applied Sciences 12, 3271. https://doi.org/10.3390/app12073271

Gandhi, P., Brager, G.S., 2016. Commercial office plug load energy consumption trends and the role of occupant behavior. Energy and Buildings 125, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.057

Gao, L., Wang, S., Li, J., Li, H., 2017. Application of the extended theory of planned behavior to understand individual's energy saving behavior in workplaces. Resources, Conservation and Recycling 127, 107–113. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.030

Ghadi, Y.Y., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., 2016. Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54, 738–744. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.105

Ghosh, A., Neogi, S., 2018. Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. Solar Energy 169, 94–104. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025

Gonçalves, D., Sheikhnejad, Y., Oliveira, M., Martins, N., 2020. One step forward toward smart city Utopia: Smart building energy management based on adaptive surrogate modelling. Energy and Buildings 223, 110146. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110146

Grant, M.J., Booth, A., 2009. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. Health Information & Libraries Journal 26, 91–108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Griessinger, T., 2019. Transition écologique: quel apport des sciences comportementales. DITP.

Grilli, G., Curtis, J., 2019. Encouraging Pro-Environmental Behaviours: a review of methods and approaches 28.

Grillone, B., Danov, S., Sumper, A., Cipriano, J., Mor, G., 2020. A review of deterministic and data-driven methods to quantify energy efficiency savings and to predict retrofitting scenarios in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 131, 110027. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110027

Grüne-Yanoff, T., Hertwig, R., 2016. Nudge Versus Boost: How Coherent are Policy and Theory? Minds & Machines 26, 149–183. https://doi.org/10.1007/s11023-015-9367-9

Guarino, F., Cellura, M., Longo, S., Gulotta, T., Mistretta, M., Tumminia, G., Ferraro, M., Antonucci, V., 2016. Integration of Building Simulation and Life Cycle Assessment: A TRNSYS Application. Energy Procedia, ATI 2016 - 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association 101, 360–367. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.046

Guerassimoff, G., Thomas, J., 2015. Enhancing energy efficiency and technical and marketing tools to change people's habits in the long-term. Energy and Buildings 104, 14–24. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.080

Guerreiro, S., Batel, S., Lima, M.L., Moreira, S., 2015. Making energy visible: sociopsychological aspects associated with the use of smart meters. Energy Efficiency 8, 1149–1167. https://doi.org/10.1007/s12053-015-9344-4

Gul, E., Wang, J., Zhang, G., 2018. Simulation and Optimization Model for Energy Efficient Building and Environmental Assessment, in: 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Presented at the 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), pp. 1–9. https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582283

Gunay, B., Beausoleil-Morrison, I., D'Oca, S., Corgnati, S., 2015. On Modelling And Simulation of Occupant Models. https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2825

Gunay, H.B., O'Brien, W., Beausoleil-Morrison, I., 2013. A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices. Building and Environment 70, 31–47. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.020

Gunay, H.B., O'Brien, W., Beausoleil-Morrison, I., Gilani, S., 2016a. Modeling plug-in equipment load patterns in private office spaces. Energy and Buildings 121, 234–249. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.001

Gunay, H.B., O'Brien, W., Beausoleil-Morrison, I., Gilani, S., 2016b. Modeling plug-in equipment load patterns in private office spaces. Energy and Buildings 121, 234–249. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.001

Gupta, A., Badr, Y., Negahban, A., Qiu, R.G., 2021. Energy-efficient heating control for smart buildings with deep reinforcement learning. Journal of Building Engineering 34, 101739. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101739

Haiad, C., Peterson, J., Reeves, P., Hirsch, J., Hirsch, J.J., 2004. Programmable Thermostats Installed into Residential Buildings: Predicting Energy Saving Using Occupant Behavior & Simulation 41.

Hakala, K., 2022. Histoire naturelle de l'architecture. Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments. Philippe Rahm (dir.), Paris, Pavillon de l'Arsenal, 3e éd. 2021 [2020], 312 p. DARD/DARD 7, 160–160. https://doi.org/10.3917/dard.007.0160

Hannan, M.A., Faisal, M., Ker, P.J., Mun, L.H., Parvin, K., Mahlia, T.M.I., Blaabjerg, F., 2018. A Review of Internet of Energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations. IEEE Access 6, 38997–39014. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2852811

Harkouss, F., Fardoun, F., Biwole, P.H., 2018. Optimization approaches and climates investigations in NZEB—A review. Build. Simul. 11, 923–952. https://doi.org/10.1007/s12273-018-0448-6

Harputlugil, T., de Wilde, P., 2021. The interaction between humans and buildings for energy efficiency: A critical review. Energy Research & Social Science 71, 101828. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101828

Hasik, V., Escott, E., Bates, R., Carlisle, S., Faircloth, B., Bilec, M.M., 2019. Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction. Building and Environment 161, 106218. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106218

Hayat, H., Griffiths, T., Brennan, D., Lewis, R.P., Barclay, M., Weirman, C., Philip, B., Searle, J.R., 2019. The State-of-the-Art of Sensors and Environmental Monitoring Technologies in Buildings. Sensors 19, 3648. https://doi.org/10.3390/s19173648

He, Z., Hong, T., Chou, S.K., 2021. A framework for estimating the energy-saving potential of occupant behaviour improvement. Applied Energy 287, 116591. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116591

Héberlé, E., Borderon, J., Burgholzer, J., 2019. Guidance for Finding a Sustainable Balance between Energy Savings and Heritage Preservation When Retrofitting Heritage Buildings. Restoration of Buildings and Monuments. https://doi.org/10.1515/rbm-2017-0007

Hee, W.J., Alghoul, M.A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M.A., Alrubaih, M.S., Sopian, K., 2015. The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 42, 323–343. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020

Hess, A.-K., Samuel, R., Burger, P., 2018. Informing a social practice theory framework with social-psychological factors for analyzing routinized energy consumption: A multivariate analysis of three practices. Energy Research & Social Science 46, 183–193. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.012

Heydarian, A., McIlvennie, C., Arpan, L., Yousefi, S., Syndicus, M., Schweiker, M., Jazizadeh, F., Rissetto, R., Pisello, A.L., Piselli, C., Berger, C., Yan, Z., Mahdavi, A., 2020a. What drives our behaviors in buildings? A review on occupant interactions with building systems from the lens of behavioral theories. Building and Environment 179, 106928. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106928

Heydarian, A., McIlvennie, C., Arpan, L., Yousefi, S., Syndicus, M., Schweiker, M., Jazizadeh, F., Rissetto, R., Pisello, A.L., Piselli, C., Berger, C., Yan, Z., Mahdavi, A., 2020b. What drives our behaviors in buildings? A review on occupant interactions with building systems from the lens of behavioral theories. Building and Environment 179, 106928. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106928

Himeur, Y., Alsalemi, A., Al-Kababji, A., Bensaali, F., Amira, A., Sardianos, C., Dimitrakopoulos, G., Varlamis, I., 2021. A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects. Information Fusion 72, 1–21. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.02.002

Hong, T., Yan, D., D'Oca, S., Chen, C., 2017. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. Building and Environment 114, 518–530. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.006

Horta, A., Wilhite, H., Schmidt, L., Bartiaux, F., 2014. Socio-Technical and Cultural Approaches to Energy Consumption: An Introduction. Nature and Culture 9, 115–121. https://doi.org/10.3167/nc.2014.090201

Hossain, M.I., Islam, S.M.R., 2019. Energy Consumption Reduction of Bangladesh using Nudge via Smart Grid: An Empirical Approach, in: 2019 International Conference on Robotics,Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). Presented at the 2019 International Conference on Robotics,Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), pp. 7–12. https://doi.org/10.1109/ICREST.2019.8644515

Hosseini, M., Tardy, F., Lee, B., 2018. Cooling and heating energy performance of a building with a variety of roof designs; the effects of future weather data in a cold climate. Journal of Building Engineering 17, 107–114. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.02.001

Hwang, Y.-H., Kim, S.-I., Jeng, J.-M., 2000. Examining the Causal Relationships Among Selected Antecedents of Responsible Environmental Behavior. The Journal of Environmental Education 31, 19–25. https://doi.org/10.1080/00958960009598647

IEA, 2021. The Potential of Behavioural Interventions for Optimising Energy Use at Home – Analysis [WWW Document]. IEA. URL https://www.iea.org/articles/the-potential-of-behavioural-interventions-for-optimising-energy-use-at-home (accessed 8.10.23).

IEA, 2017. Occupant behavior modeling approaches and evaluation (Annex 66: Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings), Energy in Buildings and Comunities Programme.

Iglesias, F., Kastner, W., 2013. Analysis of Similarity Measures in Times Series Clustering for the Discovery of Building Energy Patterns. Energies 6, 579–597. https://doi.org/10.3390/en6020579

Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G.-E., Necula, H., Badea, A., 2015. The historical evolution of the energy efficient buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 49, 243–253. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.062

Iqbal, J., Khan, M., Talha, M., Farman, H., Jan, B., Muhammad, A., Khattak, H.A., 2018. A generic internet of things architecture for controlling electrical energy consumption in smart homes. Sustainable Cities and Society 43, 443–450. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.020

James, K.L., Randall, N.P., Haddaway, N.R., 2016. A methodology for systematic mapping in environmental sciences. Environmental Evidence 5, 7. https://doi.org/10.1186/s13750-016-0059-6

Jang, H., Kang, J., 2016. A stochastic model of integrating occupant behaviour into energy simulation with respect to actual energy consumption in high-rise apartment buildings. Energy and Buildings 121, 205–216. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.037

Jani, D.B., Bhabhor, K., Dadi, M., Doshi, S., Jotaniya, P.V., Ravat, H., Bhatt, K., 2020. A review on use of TRNSYS as simulation tool in performance prediction of desiccant cooling cycle. J Therm Anal Calorim 140, 2011–2031. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08968-1

Jeon, Y., Cho, C., Seo, J., Kwon, K., Park, H., Oh, S., Chung, I.-J., 2018. IoT-based occupancy detection system in indoor residential environments. Building and Environment 132, 181–204. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.043

Jia, M., Srinivasan, R., 2020. Building Performance Evaluation Using Coupled Simulation of EnergyPlus™ and an Occupant Behavior Model. Sustainability 12, 4086. https://doi.org/10.3390/su12104086

Jia, M., Srinivasan, R.S., Raheem, A.A., 2017. From occupancy to occupant behavior: An analytical survey of data acquisition technologies, modeling methodologies and simulation coupling mechanisms for building energy efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, 525–540. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.011

Jin, S.-H., 2019. Home appliances' rebound effects estimated by a modified nonlinear model: an empirical study in South Korea. Energy Efficiency 12, 2187–2199. https://doi.org/10.1007/s12053-019-09795-x

Johnson, E.J., Shu, S.B., Dellaert, B.G.C., Fox, C., Goldstein, D.G., Häubl, G., Larrick, R.P., Payne, J.W., Peters, E., Schkade, D., Wansink, B., Weber, E.U., 2012. Beyond nudges: Tools of a choice architecture. Mark Lett 23, 487–504. https://doi.org/10.1007/s11002-012-9186-1

Josse, R., 2017. Méthode et outils pour l'identification de défauts des bâtiments connectés performants.

Jovanovic, J., Sun, X., Stevovic, S., Chen, J., 2017. Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building design. Energy and Buildings 152, 568–576. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.073

Kahneman, D., 1934- author, 2011. Thinking, fast and slow. 1st ed. New York : Farrar, Straus and Giroux, [2011] ©2011.

Kamel, E., Memari, A., 2022. Residential Building Envelope Energy Retrofit Methods, Simulation Tools, and Example Projects: A Review of the Literature. Buildings 12, 954. https://doi.org/10.3390/buildings12070954

Kamilaris, A., Neovino, J., Kondepudi, S., Kalluri, B., 2015. A case study on the individual energy use of personal computers in an office setting and assessment of various feedback types toward energy savings. Energy and Buildings 104, 73–86. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.010

Kang, Y., Ma, N., Bunster, V., W-C Chang, V., Zhou, J., 2022. Optimizing the Passive House Planning Package simulation tool: A bottom-up dynamic approach to reduce building performance gap. Energy and Buildings 276, 112512. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112512

Karjalainen, S., 2016. Should we design buildings that are less sensitive to occupant behaviour? A simulation study of effects of behaviour and design on office energy consumption. Energy Efficiency 14.

Kashif, A., 2014. Modélisation du comportement humain réactif et délibératif avec une approche multi-agent pour la gestion énergétique dans le bâtiment (thesis). Grenoble.

Kasperbauer, T.J., 2017. The permissibility of nudging for sustainable energy consumption. Energy Policy 111, 52–57. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.015

Kavousian, A., Rajagopal, R., Fischer, M., 2015. Ranking appliance energy efficiency in households: Utilizing smart meter data and energy efficiency frontiers to estimate and identify the determinants of appliance energy efficiency in residential buildings. Energy and Buildings 99, 220–230. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.052

Kawamoto, K., Koomey, J.G., Nordman, B., Brown, R.E., Piette, M.A., Ting, M., Meier, A.K., 2002. Electricity used by office equipment and network equipment in the US ℭ 15.

Kawamoto, K., Shimoda, Y., Mizuno, M., 2004. Energy saving potential of office equipment power management. Energy and Buildings 36, 915–923. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.02.004

Kazanasmaz, T., Uygun, İ.E., Akkurt, G.G., Turhan, C., Ekmen, K.E., 2014. On the relation between architectural considerations and heating energy performance of Turkish residential buildings in Izmir. Energy and Buildings 72, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.036

Keskin, C., Mengüç, M.P., 2018. On Occupant Behavior and Innovation Studies Towards High Performance Buildings: A Transdisciplinary Approach. Sustainability 10, 3567. https://doi.org/10.3390/su10103567

Khorasani Zadeh, Z., Ouf, M.M., 2022. A simulation-based framework to optimize occupant-centric controls given stochastic occupant behaviour. Building and Environment 219, 109144. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109144

Ki Kim, Y., Bande, L., Kheira Anissa, T.A., Altan, H., 2021. Dynamic Energy Performance Gap Analysis of a University Building: Case Studies at UAE University Campus, UAE [WWW Document]. URL https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/120 (accessed 7.17.22).

Kim, S., Zadeh, P.A., Staub-French, S., Froese, T., Cavka, B.T., 2016. Assessment of the Impact of Window Size, Position and Orientation on Building Energy Load Using BIM. Procedia Engineering, ICSDEC 2016 – Integrating Data Science, Construction and Sustainability 145, 1424–1431. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.179

Kim, Y., Choi, S.M., 2005. Antecedents of Green Purchase Behavior: an Examination of Collectivism, Environmental Concern, and Pce. ACR North American Advances NA-32.

Kirimtat, A., Koyunbaba, B.K., Chatzikonstantinou, I., Sariyildiz, S., 2016. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, 23–49. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020

Kjærgaard, M.B., Sangogboye, F.C., 2017. Categorization framework and survey of occupancy sensing systems. Pervasive and Mobile Computing 38, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2016.09.019

Klege, R.A., Visser, M., Datta, S., Darling, M., 2022. The Power of Nudging: Using Feedback, Competition, and Responsibility Assignment to Save Electricity in a Non-residential Setting. Environ Resource Econ. https://doi.org/10.1007/s10640-021-00639-w

Klege, R.A., Visser, M., Saugato Datu, C Matthew Darling, 2018. The Effectiveness of Competition and Responsibility Assignment in Saving Energy: A Non-Residential example of the Power of the "Nudge." https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15102.28485

Klein, L., Kwak, J., Kavulya, G., Jazizadeh, F., Becerik-Gerber, B., Varakantham, P., Tambe, M., 2012. Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems. Automation in Construction, Planning Future Cities-Selected papers from the 2010 eCAADe Conference 22, 525–536. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.11.012

Kochański, M., Korczak, K., Skoczkowski, T., 2020. Technology Innovation System Analysis of Electricity Smart Metering in the European Union. Energies 13, 916. https://doi.org/10.3390/en13040916

Konstantakopoulos, I.C., Barkan, A.R., He, S., Veeravalli, T., Liu, H., Spanos, C., 2019a. A deep learning and gamification approach to improving human-building interaction and energy efficiency in smart infrastructure. Applied Energy 237, 810–821. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.065

Konstantakopoulos, I.C., Barkan, A.R., He, S., Veeravalli, T., Liu, H., Spanos, C., 2019b. A deep learning and gamification approach to improving human-building interaction and energy efficiency in smart infrastructure. Applied Energy 237, 810–821. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.065

Kovacic, I., Zoller, V., 2015. Building life cycle optimization tools for early design phases. Energy, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 92, 409–419. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.027

Krarti, M., 2022. Energy performance of control strategies for smart glazed windows applied to office buildings. Journal of Building Engineering 45, 103462. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103462

Kriechbaumer, T., Jacobsen, H.-A., 2018. BLOND, a building-level office environment dataset of typical electrical appliances. Sci Data 5, 180048. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.48

Kumar, Anuj, Singh, A., Kumar, Ashok, Singh, M.K., Mahanta, P., Mukhopadhyay, S.C., 2018. Sensing Technologies for Monitoring Intelligent Buildings: A Review. IEEE Sensors Journal 18, 4847–4860. https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2829268

Kunwar, N., Cetin, K.S., Passe, U., Zhou, X., Li, Y., 2020. Energy savings and daylighting evaluation of dynamic venetian blinds and lighting through full-scale experimental testing. Energy 197, 117190. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117190

Kwac, J., Tan, C.-W., Sintov, N., Flora, J., Rajagopal, R., 2013. Utility customer segmentation based on smart meter data: Empirical study, in: 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Presented at the 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 720–725. https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2013.6688044

La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires, 2021. . CODA Stratégies.

La Fabrique Ecologique, 2016. Les nudges, un nouvel outil des politiques publiques. fondation pluraliste de l'écologie.

Landuyt, L., De Turck, S., Laverge, J., Steeman, M., Van Den Bossche, N., 2021. Balancing environmental impact, energy use and thermal comfort: Optimizing insulation levels for

The Mobble with standard HVAC and personal comfort systems. Building and Environment 206, 108307. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108307

Langevin, J., Wen, J., Gurian, P.L., 2014. INCLUDING OCCUPANTS IN BUILDING PERFORMANCE SIMULATION: INTEGRATION OF AN AGENT-BASED OCCUPANT BEHAVIOR ALGORITHM WITH ENERGYPLUS 9.

Latortue, X., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., 2018. LES CHANTIERS DE L'ECO-CONCEPTION: Etat des lieux de la Recherche dans le 76.

Lazaric, N., Le Guel, F., Belin, J., Oltra, V., Lavaud, S., Douai, A., 2020. Determinants of sustainable consumption in France: the importance of social influence and environmental values. J Evol Econ 30, 1337–1366. https://doi.org/10.1007/s00191-019-00654-7

Lazaric, N., Toumi, M., 2022. Reducing consumption of electricity: A field experiment in Monaco with boosts and goal setting. Ecological Economics 191, 107231. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107231

Lee, D., Cheng, C.-C., 2016. Energy savings by energy management systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 56, 760–777. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.067

Lee, Y.S., Malkawi, A.M., 2014a. Simulating multiple occupant behaviors in buildings: An agent-based modeling approach. Energy and Buildings 69, 407–416. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.020

Lee, Y.S., Malkawi, A.M., 2014b. Simulating multiple occupant behaviors in buildings: An agent-based modeling approach. Energy and Buildings 69, 407–416. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.020

Lehner, M., Mont, O., Heiskanen, E., 2016. Nudging – A promising tool for sustainable consumption behaviour? Journal of Cleaner Production, Special Volume: Transitions to Sustainable Consumption and Production in Cities 134, 166–177. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.086

Lévy, J.-P., Belaïd, F., 2018. The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, 2104–2114. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.022

Li, D., Xu, X., Chen, C., Menassa, C., 2019a. Understanding energy-saving behaviors in the American workplace: A unified theory of motivation, opportunity, and ability. Energy Research & Social Science 51, 198–209. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.020

Li, D., Xu, X., Chen, C., Menassa, C., 2019b. Understanding energy-saving behaviors in the American workplace: A unified theory of motivation, opportunity, and ability. Energy Research & Social Science 51, 198–209. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.020

Li, D., Xu, X., Chen, C., Menassa, C., 2019c. Understanding energy-saving behaviors in the American workplace: A unified theory of motivation, opportunity, and ability. Energy Research & Social Science 51, 198–209. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.020

Li, J., Panchabikesan, K., Yu, Z., Haghighat, F., Mankibi, M.E., Corgier, D., 2019. Systematic data mining-based framework to discover potential energy waste patterns in residential

buildings. Energy and Buildings 199, 562–578. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.032

Li, P., Froese, T.M., Brager, G., 2018. Post-occupancy evaluation: State-of-the-art analysis and state-of-the-practice review. Building and Environment 133, 187–202. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.024

Linder, N., Giusti, M., Samuelsson, K., Barthel, S., 2022. Pro-environmental habits: An underexplored research agenda in sustainability science. Ambio 51, 546–556. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01619-6

Liu, P., Teng, M., Han, C., 2020. How does environmental knowledge translate into pro-environmental behaviors?: The mediating role of environmental attitudes and behavioral intentions. Science of The Total Environment 728, 138126. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138126

Liu, S., Kwok, Y.T., Lau, K.K.-L., Chan, P.W., Ng, E., 2019. Investigating the energy saving potential of applying shading panels on opaque façades: A case study for residential buildings in Hong Kong. Energy and Buildings 193, 78–91. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.044

Liu, X., Wang, Q., Wei, H.-H., Chi, H.-L., Ma, Y., Jian, I.Y., 2020. Psychological and Demographic Factors Affecting Household Energy-Saving Intentions: A TPB-Based Study in Northwest China. Sustainability 12, 836. https://doi.org/10.3390/su12030836

Liu, Z., Hou, J., Zhang, L., Dewancker, B.J., Meng, X., Hou, C., 2022. Research on energy-saving factors adaptability of exterior envelopes of university teaching-office buildings under different climates (China) based on orthogonal design and EnergyPlus. Heliyon 8, e10056. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10056

Lo, S.H., Peters, G.-J.Y., van Breukelen, G.J.P., Kok, G., 2014a. Only reasoned action? An interorganizational study of energy-saving behaviors in office buildings. Energy Efficiency 7, 761–775. https://doi.org/10.1007/s12053-014-9254-x

Lo, S.H., Peters, G.-J.Y., van Breukelen, G.J.P., Kok, G., 2014b. Only reasoned action? An interorganizational study of energy-saving behaviors in office buildings. Energy Efficiency 7, 761–775. https://doi.org/10.1007/s12053-014-9254-x

Lopez-de-Armentia, J., Casado-Mansilla, D., Lopez-Perez, S., Lopez-de-Ipina, D., 2014. Reducing Energy Waste through Eco-aware Smart Everyday Things.

LTECV, 2015a. , 2015-992.

LTECV, 2015b. LTECV - Article 188, 2015-992.

Lu, S., Tang, X., Ji, L., Tu, D., 2017. Research on Energy-Saving Optimization for the Performance Parameters of Rural-Building Shape and Envelope by TRNSYS-GenOpt in Hot Summer and Cold Winter Zone of China. Sustainability 9, 294. https://doi.org/10.3390/su9020294

Maalej, R., Amami, I., 2014. Un méta-modèle de transition vers une nouvelle économie : les défis d'une transition écologique efficace.

Magni, M., Ochs, F., de Vries, S., Maccarini, A., Sigg, F., 2021. Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study. Energy and Buildings 250, 111260. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111260

Magnin, G., 2014. La transition énergétique pour quelle société? 17.

Mahdavi, A., Berger, C., Amin, H., Ampatzi, E., Andersen, R.K., Azar, E., Barthelmes, V.M., Favero, M., Hahn, J., Khovalyg, D., Knudsen, H.N., Luna-Navarro, A., Roetzel, A., Sangogboye, F.C., Schweiker, M., Taheri, M., Teli, D., Touchie, M., Verbruggen, S., 2021. The Role of Occupants in Buildings' Energy Performance Gap: Myth or Reality? Sustainability 13, 3146. https://doi.org/10.3390/su13063146

Mahdavi, A., Tahmasebi, F., 2015. Predicting people's presence in buildings: An empirically based model performance analysis. Energy and Buildings 86, 349–355. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.027

Mangruwa, R.D., Zaki, S.A., Mahdzir, A., Khalid, W., 2015. A REVIEW OF CROSS-CULTURAL ANALYSIS ON ENERGY BEHAVIOUR CONSUMPTION IN RESIDENTIAL BUILDING BETWEEN MALAYSIA AND JAPAN. p. 7.

Marcello, F., Pilloni, V., Giusto, D., 2019. Sensor-Based Early Activity Recognition Inside Buildings to Support Energy and Comfort Management Systems. Energies 12, 2631. https://doi.org/10.3390/en12132631

Marinakis, V., 2020. Big Data for Energy Management and Energy-Efficient Buildings. Energies 13, 1555. https://doi.org/10.3390/en13071555

Marincioni, V., Gori, V., de Place Hansen, E.J., Herrera-Avellanosa, D., Mauri, S., Giancola, E., Egusquiza, A., Buda, A., Leonardi, E., Rieser, A., 2021. How Can Scientific Literature Support Decision-Making in the Renovation of Historic Buildings? An Evidence-Based Approach for Improving the Performance of Walls. Sustainability 13, 2266. https://doi.org/10.3390/su13042266

Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M., 2017. Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. Journal of Building Engineering 13, 169–183. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.001

Markovic, R., Wolf, S., Cao, J., Spinnräker, E., Wölki, D., Frisch, J., van Treeck, C., 2017. Comparison of Different Classification Algorithms for the Detection of User's Interaction with Windows in Office Buildings. Energy Procedia, CISBAT 2017 International ConferenceFuture Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale 122, 337–342. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.333

Marschall, M., 2019. Including Occupant Behavior in Building Simulation: Comparison of a Deterministic vs. a Stochastic Approach. 2019 Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design.

Martin, S., Gaspard, A., 2017. Les comportements, levier de la transition écologique ? Futuribles N° 419, 33–44.

Martinaitis, V., Zavadskas, E.K., Motuzienė, V., Vilutienė, T., 2015. Importance of occupancy information when simulating energy demand of energy efficient house: A case study. Energy and Buildings 101, 64–75. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.031

Martínez-Espiñeira, R., García-Valiñas, M.A., Nauges, C., 2014. Households' pro-environmental habits and investments in water and energy consumption: Determinants and relationships. Journal of Environmental Management 133, 174–183. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.002

Massimo, D.E., Del Giudice, V., Malerba, A., Bernardo, C., Musolino, M., De Paola, P., 2021. Valuation of Ecological Retrofitting Technology in Existing Buildings: A Real-World Case Study. Sustainability 13, 7001. https://doi.org/10.3390/su13137001

Mathieu, J.L., Price, P.N., Kiliccote, S., Piette, M.A., 2011. Quantifying Changes in Building Electricity Use, With Application to Demand Response. IEEE Transactions on Smart Grid 2, 507–518. https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2145010

Menezes, A.C., Cripps, A., Buswell, R.A., Bouchlaghem, D., 2013. Benchmarking small power energy consumption in office buildings in the United Kingdom: A review of data published in CIBSE Guide F. Building Services Engineering Research and Technology 34, 73–86. https://doi.org/10.1177/0143624412465092

Merlet, Y., Rouchier, S., Jay, A., Woloszyn, M., 2018. Couplage de l'optimisation multi-objectif avec la simulation thermique dynamique pour la rénovation de parcs de bâtiments 9.

Metallidou, C.K., Psannis, K.E., Egyptiadou, E.A., 2020. Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches. IEEE Access 8, 63679–63699. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984461

Méthode de calcul Th-BCE 2012, 2013. . CSTB.

Meziane, M.N., 2016. Identification d'appareils électriques par analyse des courants de mise en marche 174.

Mi, R., Chen, C., Keplinger, T., Pei, Y., He, S., Liu, D., Li, J., Dai, J., Hitz, E., Yang, B., Burgert, I., Hu, L., 2020. Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. Nat Commun 11, 3836. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17513-w

Miao, L., Wei, W., 2016. Consumers' Pro-Environmental Behavior and Its Determinants in the Lodging Segment. Journal of Hospitality & Tourism Research 40, 319–338. https://doi.org/10.1177/1096348013495699

Mingfang, T., 2002. Solar control for buildings. Building and Environment 37, 659–664. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00063-4

Mo, Y., Zhao, D., 2021. Effective factors for residential building energy modeling using feature engineering. Journal of Building Engineering 44, 102891. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102891

Moazzen, N., Ashrafian, T., Yilmaz, Z., Karagüler, M.E., 2020. A multi-criteria approach to affordable energy-efficient retrofit of primary school buildings. Applied Energy 268, 115046. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115046

Mondrup, T.F., Karlshøj, J., Vestergaard, F., 2014. Building Performance Simulation tools for planning of energy efficiency retrofits.

Moorefield, L., Frazer, B., Bendt, P., 2008. Office Plug Load Field Monitoring Report. Ecos.

Morris, J., Oliveira, S., 2019. Exploring employee energy efficiency awareness in UK commercial offices: IT and small power. Energy Efficiency 12, 1237–1252. https://doi.org/10.1007/s12053-018-9748-z

Mostafavi, F., Tahsildoost, M., Zomorodian, Z., 2021. Energy efficiency and carbon emission in high-rise buildings: A review (2005-2020). Building and Environment 206, 108329. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108329

Murano, G., Primo, E., Corrado, V., 2018. The effect of glazing on nZEB performance. Energy Procedia, ATI 2018 - 73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association 148, 320–327. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.084

Muroni, A., Gaetani, I., Hoes, P.-J., Hensen, J.L.M., 2019. Occupant behavior in identical residential buildings: A case study for occupancy profiles extraction and application to building performance simulation. Build. Simul. 12, 1047–1061. https://doi.org/10.1007/s12273-019-0573-x

Mustafaraj, G., Marini, D., Costa, A., Keane, M., 2014. Model calibration for building energy efficiency simulation. Applied Energy 130, 72–85. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.019

Naspi, F., Arnesano, M., Stazi, F., D'Orazio, M., Revel, G.M., 2018. Measuring Occupants' Behaviour for Buildings' Dynamic Cosimulation. Journal of Sensors 2018, 1–17. https://doi.org/10.1155/2018/2756542

Nguyen, T.A., Aiello, M., 2012. BEYOND INDOOR PRESENCE MONITORING WITH SIMPLE SENSORS 10.

Nie, H., Vasseur, V., Fan, Y., Xu, J., 2019. Exploring reasons behind careful-use, energy-saving behaviours in residential sector based on the theory of planned behaviour: Evidence from Changchun, China. Journal of Cleaner Production 230, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.101

Norouziasl, S., Jafari, A., Zhu, Y., 2021. Modeling and simulation of energy-related human-building interaction: A systematic review. Journal of Building Engineering 44, 102928. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102928

Obaidellah, U.H., Danaee, M., Mamun, M.A.A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2019a. An application of TPB constructs on energy-saving behavioural intention among university office building occupants: a pilot study in Malaysian tropical climate. J Hous and the Built Environ 34, 533–569. https://doi.org/10.1007/s10901-018-9637-y

Obaidellah, U.H., Danaee, M., Mamun, M.A.A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2019b. An application of TPB constructs on energy-saving behavioural intention among university office building occupants: a pilot study in Malaysian tropical climate. J Hous and the Built Environ 34, 533–569. https://doi.org/10.1007/s10901-018-9637-y

Obaidellah, U.H., Danaee, M., Mamun, M.A.A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2019c. An application of TPB constructs on energy-saving behavioural intention among university office building occupants: a pilot study in Malaysian tropical climate. J Hous and the Built Environ 34, 533–569. https://doi.org/10.1007/s10901-018-9637-y

O'Brien, W., Wagner, A., Schweiker, M., Mahdavi, A., Day, J., Kjærgaard, M.B., Carlucci, S., Dong, B., Tahmasebi, F., Yan, D., Hong, T., Gunay, H.B., Nagy, Z., Miller, C., Berger, C., 2020. Introducing IEA EBC annex 79: Key challenges and opportunities in the field of occupant-centric building design and operation. Building and Environment 178, 106738. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106738

OCDE, 2019. Tools and Ethics for Applied Behavioural Insights: The BASIC Toolkit.

Octav-Ionut, M., 2015. Applying the Theory of Planned Behavior in Predicting Pro-environmental Behaviour: The Case of Energy Conservation. Acta Universitatis Danubius. Œconomica 11, 15–32.

Ofetotse, E.L., Essah, E.A., Yao, R., 2021. Evaluating the determinants of household electricity consumption using cluster analysis. Journal of Building Engineering 43, 102487. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102487

Omrani, S., Garcia-Hansen, V., Capra, B., Drogemuller, R., 2017. Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. Building and Environment 116, 182–194. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012

Omrany, H., Ghaffarianhoseini, Ali, Ghaffarianhoseini, Amirhosein, Raahemifar, K., Tookey, J., 2016. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 62, 1252–1269. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.010

Oppong-Tawiah, D., Webster, J., Staples, S., Cameron, A.-F., Ortiz de Guinea, A., Hung, T.Y., 2020. Developing a gamified mobile application to encourage sustainable energy use in the office. Journal of Business Research 106, 388–405. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.051

P. Yadav, D., 2017. Energy Saving Assessment for Building Envelope of Supermarket Based on EnergyPlus and Openstudio. AJCE 5, 141. https://doi.org/10.11648/j.ajce.20170503.13

Pacheco, R., Ordóñez, J., Martínez, G., 2012. Energy efficient design of building: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 3559–3573. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045

Pal, M., Alyafi, A.A., Ploix, S., Reignier, P., Bandyopadhyay, S., 2019. Unmasking the causal relationships latent in the interplay between occupant's actions and indoor ambience: A building energy management outlook. Applied Energy 238, 1452–1470. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.118

Palacios-Munoz, B., Peuportier, B., Gracia-Villa, L., López-Mesa, B., 2019. Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach. Building and Environment 160, 106203. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106203

Panchabikesan, K., Haghighat, F., Mankibi, M.E., 2021. Data driven occupancy information for energy simulation and energy use assessment in residential buildings. Energy 218, 119539. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119539

Pannier, M.-L., Recht, T., Robillart, M., Schalbart, P., Peuportier, B., Mora, L., 2021. Identifying optimal renovation schedules for building portfolios: Application in a social housing context under multi-year funding constraints. Energy and Buildings 250, 111290. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111290

Pannier, M.-L., Remoué, T., Bigaud, D., 2022. Stochastic comparative LCA of smart buildings. E3S Web Conf. 349, 04012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234904012

Pannier, M.-L., Schalbart, P., Peuportier, B., 2016. Identification of influential parameters in building energy simulation and life cycle assessment, in: Eighth International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output. Le Tampon, Reunion Island, France.

Paone, A., Bacher, J.-P., 2018. The Impact of Building Occupant Behavior on Energy Efficiency and Methods to Influence It: A Review of the State of the Art. Energies 11, 953. https://doi.org/10.3390/en11040953

Park, H., 2020. Human Comfort-Based-Home Energy Management for Demand Response Participation. Energies 13, 2463. https://doi.org/10.3390/en13102463

Parker, D., Mills, E., Rainer, L., Bourassa, N., Homan, G., 2012. Accuracy of the Home Energy Saver Energy Calculation Methodology. p. 17.

Parys, W., Souyri, B., Woloszyn, M., 2014. Agent-based behavioural models for residential buildings in dynamic building simulation: state-of-the-art and integrated model assembly.

Patel, J., Modi, A., Paul, J., 2017. Pro-environmental behavior and socio-demographic factors in an emerging market. Asian Journal of Business Ethics 6, 189–214. https://doi.org/10.1007/s13520-016-0071-5

Pathirana, S., Rodrigo, A., Halwatura, R., 2019. Effect of building shape, orientation, window to wall ratios and zones on energy efficiency and thermal comfort of naturally ventilated houses in tropical climate. Int J Energy Environ Eng 10, 107–120. https://doi.org/10.1007/s40095-018-0295-3

Peuportier, B., Blanc Sommereux, I., 1988. Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. International Journal of Solar Energy 8. https://doi.org/doi.org/10.1080/01425919008909714

Peuportier, B., Schalbart, P., 2022. L'apport des technologies en matière de simulation numérique. Annales des Mines - Réalités industrielles Mai 2022, 62–65. https://doi.org/10.3917/rindu1.222.0062

Ponce, P., Meier, A., Miranda, J., Molina, A., Peffer, T., 2019. The Next Generation of Social Products Based on Sensing, Smart and Sustainable (S3) Features: A Smart Thermostat as Case Study. IFAC-PapersOnLine, 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019 52, 2390–2395. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.564

Power Management Statistics: Information Technology - Northwestern University [WWW Document], 2018. URL https://www.it.northwestern.edu/hardware/eco/stats.html (accessed 10.29.22).

Qin, H., Pan, W., 2020. Energy use of subtropical high-rise public residential buildings and impacts of energy saving measures. Journal of Cleaner Production 254, 120041. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120041

Queiroz, N., Westphal, F.S., Ruttkay Pereira, F.O., 2020. A performance-based design validation study on EnergyPlus for daylighting analysis. Building and Environment 183, 107088. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107088

Rabiu, A., Na, W.-H., Akpenpuun, T.D., Rasheed, A., Adesanya, M.A., Ogunlowo, Q.O., Kim, H.T., Lee, H.-W., 2022. Determination of overall heat transfer coefficient for greenhouse energy-saving screen using Trnsys and hotbox. Biosystems Engineering 217, 83–101. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.03.002

Rafsanjani, H.N., Ghahramani, A., 2019. Extracting occupants' energy-use patterns from Wi-Fi networks in office buildings. Journal of Building Engineering 26, 100864. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100864

Rafsanjani, H.N., Ghahramani, A., Nabizadeh, A.H., 2020. iSEA: IoT-based smartphone energy assistant for prompting energy-aware behaviors in commercial buildings. Applied Energy 266, 114892. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114892

Ramallo-González, A.P., Bardaki, C., Kotsopoulos, D., Tomat, V., González Vidal, A., Fernandez Ruiz, P.J., Skarmeta Gómez, A., 2022. Reducing Energy Consumption in the Workplace via IoT-Allowed Behavioural Change Interventions. Buildings 12, 708. https://doi.org/10.3390/buildings12060708

Rau, H., Moran, P., Manton, R., Goggins, J., 2020. Changing energy cultures? Household energy use before and after a building energy efficiency retrofit. Sustainable Cities and Society 54, 101983. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101983

Recht, T., Munaretto, F., Schalbart, P., Peuportier, B., 2014. Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif. 8.

Reckwitz, A., 2002. Toward a Theory of Social Practices: A Development in Culturalist Theorizing. European Journal of Social Theory 5, 243–263. https://doi.org/10.1177/13684310222225432

Reddick, C., Sorin, M., Bonhivers, J.-C., Laperle, D., 2020. Waste heat and renewable energy integration in buildings. Energy and Buildings 211, 109803. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109803

Remeikienė, R., Gasparėnienė, L., Fedajev, A., Szarucki, M., Đekić, M., Razumienė, J., 2021. Evaluation of Sustainable Energy Development Progress in EU Member States in the Context of Building Renovation. Energies 14, 4209. https://doi.org/10.3390/en14144209

Ren, X., Yan, D., Hong, T., 2015. Data mining of space heating system performance in affordable housing. Building and Environment 89, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.009

Roberson, J.A., Homan, G.K., Mahajan, A., Nordman, B., Webber, C.A., Brown, R.E., McWhinney, M., Koomey, J.G., 2002. Energy Use and Power Levels in New Monitors and Personal Computers (No. LBNL--48581, 799557). https://doi.org/10.2172/799557

Rodriguez-Ubinas, E., Montero, C., Porteros, M., Vega, S., Navarro, I., Castillo-Cagigal, M., Matallanas, E., Gutiérrez, A., 2014. Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. Energy and Buildings, SCIENCE BEHIND AND BEYOND THE SOLAR DECATHLON EUROPE 2012 83, 10–22. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.074

RTE, 2021. Futurs énergétiques 2050.

Ruokamo, E., Meriläinen, T., Karhinen, S., Räihä, J., Suur-Uski, P., Timonen, L., Svento, R., 2022. The effect of information nudges on energy saving: Observations from a randomized field experiment in Finland. Energy Policy 161, 112731. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112731

Safa, A.A., Fung, A.S., Kumar, R., 2015. Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation. Renewable Energy 83, 565–575. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.008

Salim, F.D., Dong, B., Ouf, M., Wang, Q., Pigliautile, I., Kang, X., Hong, T., Wu, W., Liu, Y., Rumi, S.K., Rahaman, M.S., An, J., Deng, H., Shao, W., Dziedzic, J., Sangogboye, F.C., Kjærgaard, M.B., Kong, M., Fabiani, C., Pisello, A.L., Yan, D., 2020. Modelling urban-scale occupant behaviour, mobility, and energy in buildings: A survey. Building and Environment 183, 106964. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106964

Salimi, S., Hammad, A., 2019. Critical review and research roadmap of office building energy management based on occupancy monitoring. Energy and Buildings 182, 214–241. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.007

Sembroiz, D., Careglio, D., Ricciardi, S., Fiore, U., 2019. Planning and operational energy optimization solutions for smart buildings. Information Sciences 476, 439–452. https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.06.003

Shabunko, V., Lim, C.M., Mathew, S., 2018. EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam. Energy and Buildings 169, 507–516. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.039

Shankar, A., Krishnasamy, V., Chitti Babu, B., 2020. Smart LED lighting system with occupants' preference and daylight harvesting in office buildings. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 0, 1–21. https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1859650

Shi, X., Si, B., Zhao, J., Tian, Z., Wang, C., Jin, X., Zhou, X., 2019. Magnitude, Causes, and Solutions of the Performance Gap of Buildings: A Review. Sustainability 11, 937. https://doi.org/10.3390/su11030937

Shrivastava, R.L., Vinod Kumar, Untawale, S.P., 2017. Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 126–143. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005

Simanaviciene, Z., Volochovic, A., Vilke, R., Palekiene, O., Simanavicius, A., 2015. Research Review of Energy Savings Changing People's Behavior: A Case of Foreign Country. Procedia -

Social and Behavioral Sciences, The Proceedings of 6th World Conference on educational Sciences 191, 1996–2001. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.315

Singer, J., Roth, T., Wang, C., Nguyen, C., Lee, H., 2019. EnergyPlus Integration Into Cosimulation Environment to Improve Home Energy Saving Through Cyber-Physical Systems Development. Journal of Energy Resources Technology 141. https://doi.org/10.1115/1.4042224

Singler, E., 2018. Guide de l'économie comportementale: Articles et ressources en économie comportyemntale et NUDGE. Labrador et BVA.

Singler, E., 2015. Green Nudge: Changer les comportements pour sauver la planète. Pearson.

Song, M., Mao, N., Xu, Y., Deng, S., 2019. Challenges in, and the development of, building energy saving techniques, illustrated with the example of an air source heat pump. Thermal Science and Engineering Progress 10, 337–356. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.03.002

Soomro, A.M., Bharathy, G., Biloria, N., Prasad, M., 2021. A review on motivational nudges for enhancing building energy conservation behavior. JSEGC. https://doi.org/10.20517/jsegc.2020.03

Stankovic, L., Stankovic, V., Liao, J., Wilson, C., 2016. Measuring the energy intensity of domestic activities from smart meter data. Applied Energy 183, 1565–1580. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.087

Stern, P.C., 2017. How can social science research become more influential in energy transitions? Energy Research & Social Science 26, 91–95. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.010

Stern, P.C., 2000. Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior 18.

Stern, P.C., Dietz, T., Abel, T., Guagnano, G.A., Kalof, L., 1999. A Value-Belief-Norm Theory of Support for Social Movements: The Case of Environmentalism. Human Ecology Review 6, 81–97.

Stoppel, C.M., Leite, F., 2014. Integrating probabilistic methods for describing occupant presence with building energy simulation models. Energy and Buildings 68, 99–107. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.042

Su, S., Li, J., Yuan, J., Tang, M., Wang, E., Ding, Y., 2022. How can energy saving culture of a company influence energy behaviors and consumptions in its offices? A simulation and optimization model. Journal of Building Engineering 58, 105011. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105011

Su, Y.-W., 2019. Residential electricity demand in Taiwan: Consumption behavior and rebound effect. Energy Policy 124, 36–45. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.009

Sun, K., Hong, T., 2017. A simulation approach to estimate energy savings potential of occupant behavior measures. Energy and Buildings 43–62. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.010

Sütterlin, B., Brunner, T.A., Siegrist, M., 2011. Who puts the most energy into energy conservation? A segmentation of energy consumers based on energy-related behavioral

characteristics. Energy Policy, Clean Cooking Fuels and Technologies in Developing Economies 39, 8137–8152. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.008

Tan, Y., Luo, T., Xue, X., Shen, G.Q., Zhang, G., Hou, L., 2021. An empirical study of green retrofit technologies and policies for aged residential buildings in Hong Kong. Journal of Building Engineering 39, 102271. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102271

Tang, G., Wu, K., Lei, J., 2014. Semi-Intrusive Load Monitoring for Large-Scale Appliances.

Testa, F., Cosic, A., Iraldo, F., 2016. Determining factors of curtailment and purchasing energy related behaviours. Journal of Cleaner Production 112, 3810–3819. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.134

Tetlow, R.M., van Dronkelaar, C., Beaman, C.P., Elmualim, A.A., Couling, K., 2015. Identifying behavioural predictors of small power electricity consumption in office buildings. Building and Environment 92, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.009

Tewolde, M., Longtin, J.P., Das, S.R., Sharma, S., 2013. Determining appliance energy usage with a high-resolution metering system for residential natural gas meters. Applied Energy 108, 363–372. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.032

Thaler, R.H., 2008. Mental Accounting and Consumer Choice. Marketing Science 27, 15–25. https://doi.org/10.1287/mksc.1070.0330

Thaler, R.H., Sunstein, C.R., 2009. Nudge: Improving decisions about health, wealth and happiness, Penguin. ed. New York, NY.

Tien, P.W., Wei, S., Liu, T., Calautit, J., Darkwa, J., Wood, C., 2021. A deep learning approach towards the detection and recognition of opening of windows for effective management of building ventilation heat losses and reducing space heating demand. Renewable Energy 177, 603–625. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.155

Tijani, K., Ngo, Q.D., Ploix, S., Haas, B., Dugdale, J., 2015. Towards a General Framework for an Observation and Knowledge based Model of Occupant Behaviour in Office Buildings. Energy Procedia, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 609–614. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.035

Touzani, S., Granderson, J., Fernandes, S., 2018. Gradient boosting machine for modeling the energy consumption of commercial buildings. Energy and Buildings 158, 1533–1543. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.039

Triandis, H.C., 1979. Values, attitudes, and interpersonal behavior. Nebraska Symposium on Motivation 27, 195–259.

Tronchin, L., Manfren, M., Nastasi, B., 2018. Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 95, 341–353. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.060

Valladares-Rendón, L.G., Schmid, G., Lo, S.-L., 2017. Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. Energy and Buildings 140, 458–479. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073

van der Werff, E., Steg, L., 2016. The psychology of participation and interest in smart energy systems: Comparing the value-belief-norm theory and the value-identity-personal norm model. Energy Research & Social Science 22, 107–114. https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.022

van Dronkelaar, C., Dowson, M., Spataru, C., Mumovic, D., 2016. A Review of the Regulatory Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings. Front. Mech. Eng. 1. https://doi.org/10.3389/fmech.2015.00017

Veillette, D., Rouleau, J., Gosselin, L., 2021. Impact of Window-to-Wall Ratio on Heating Demand and Thermal Comfort When Considering a Variety of Occupant Behavior Profiles. Frontiers in Sustainable Cities 3.

Vermont, B., Domergue, S., 2020. Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires - Quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050 ?

Viegas, J.L., Vieira, S.M., Melício, R., Mendes, V.M.F., Sousa, J.M.C., 2016. Classification of new electricity customers based on surveys and smart metering data. Energy 107, 804–817. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.065

Vorger, É., 2015. Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment.

Wagner, A., O'Brien, W., Dong, B. (Eds.), 2018. Exploring Occupant Behavior in Buildings. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61464-9

Wan, S., Ding, G., Runeson, G., Liu, Y., 2022. Sustainable Buildings' Energy-Efficient Retrofitting: A Study of Large Office Buildings in Beijing. Sustainability 14, 1021. https://doi.org/10.3390/su14021021

Wang, H., Olesen, B.W., Kazanci, O.B., 2019. Using thermostats for indoor climate control in offices: The effect on thermal comfort and heating/cooling energy use. Energy and Buildings 188–189, 71–83. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.030

Wang, J. (Jialiang), Shi, D., 2017. Spectral selective and photothermal nano structured thin films for energy efficient windows. Applied Energy 208, 83–96. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.066

Wang, J., Tse, N.C.F., Poon, T.Y., Chan, J.Y.C., 2018. A Practical Multi-Sensor Cooling Demand Estimation Approach Based on Visual, Indoor and Outdoor Information Sensing. Sensors 18, 3591. https://doi.org/10.3390/s18113591

Wang, J., Zhu, J., Ding, Z., Zou, P.X.W., Li, J., 2019. Typical energy-related behaviors and gender difference for cooling energy consumption. Journal of Cleaner Production 238, 117846. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117846

Wang, Q.-C., Xie, K.-X., Liu, X., Shen, G.Q.P., Wei, H.-H., Liu, T.-Y., 2021. Psychological Drivers of Hotel Guests' Energy-Saving Behaviours—Empirical Research Based on the Extended Theory of Planned Behaviour. Buildings 11, 401. https://doi.org/10.3390/buildings11090401

Wang, Z., Hong, T., Jia, R., 2019. Buildings.Occupants: a Modelica package for modelling occupant behaviour in buildings. Journal of Building Performance Simulation 12, 433–444. https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1543352

Wee, S.-C., Choong, W.-W., Low, S.-T., 2021. Can "Nudging" Play a Role to Promote Pro-Environmental Behaviour? Environmental Challenges 5, 100364. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100364

Weerasuriya, A.U., Zhang, X., Gan, V.J.L., Tan, Y., 2019. A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings. Building and Environment 153, 218–232. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.027

Wei, Y., Zhang, X., Shi, Y., Xia, L., Pan, S., Wu, J., Han, M., Zhao, X., 2018. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 1027–1047. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.108

Weinmann, M., Schneider, C., Brocke, J. vom, 2016. Digital Nudging. Bus Inf Syst Eng 58, 433–436. https://doi.org/10.1007/s12599-016-0453-1

Welsby, D., Price, J., Pye, S., Ekins, P., 2021. Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. Nature 597, 230–234. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8

Woo, J., Fenner, A.E., Asutosh, A., Kim, D., Razkenari, M.A., Kibert, C.J., 2018. A review of the state-of-the-art machine learning algorithms for building energy consumption prediction 7.

Wu, A., Singh, J., Tikasz, P., 2013. Independent Study on Changing Student Behaviour to Increase Energy Sustainability and Efficiency at the Macdonald Campus of McGill University. Consilience 154–179.

Wurtz, A., Schalbart, P., Peuportier, B., 2021. Application of optimisation, building energy simulation and life cycle assessment to the design of an urban project. Presented at the 2021 Building Simulation Conference. https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30616

Xie, J., Li, H., Li, C., Zhang, J., Luo, M., 2020. Review on occupant-centric thermal comfort sensing, predicting, and controlling. Energy and Buildings 226, 110392. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110392

Yahiaoui, A., 2018. Experimental study on modelling and control of lighting components in a test-cell building. Solar Energy 166, 390–408. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.018

Yan, D., Hong, T., 2018. Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings 172.

Yan, D., Hong, T., Dong, B., Mahdavi, A., D'Oca, S., Gaetani, I., Feng, X., 2017. IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings. Energy and Buildings 156, 258–270. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.084

Yan, D., O'Brien, W., Hong, T., Feng, X., Burak Gunay, H., Tahmasebi, F., Mahdavi, A., 2015. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. Energy and Buildings 107, 264–278. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032

Yue, T., Long, R., Chen, H., 2013. Factors influencing energy-saving behavior of urban households in Jiangsu Province. Energy Policy 62, 665–675. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.051

Yun, G.Y., Steemers, K., 2008. Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer. Building and Environment 43, 1471–1482. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.08.001

zadeh, Z.K., Ouf, M.M., 2021. Optimizing occupant-centric building controls given stochastic occupant behaviour. J. Phys.: Conf. Ser. 2069, 012140. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012140

Zangheri, P., Armani, R., Pietrobon, M., Pagliano, L., 2018. Identification of cost-optimal and NZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe. Energy Efficiency 11, 337–369. https://doi.org/10.1007/s12053-017-9566-8

Zaraket, T., 2014. Stochastic activity-based approach of occupant-related energy consumption in residential buildings (thesis). Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.

Zélem, M.-C., 2018. Saving energy: Buildings and their occupants. Annales des Mines - Responsabilite et environnement 90, 26–34.

Zélem, M.-C., 2010. Politique de maîtrise de la demande d'énergie et résistances au changement. http://journals.openedition.org/lectures.

Zhang, C., Jia, Q.-S., 2016. A review of occupant behavior models in residential building: Sensing, modeling, and prediction, in: 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Presented at the 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp. 2032–2037. https://doi.org/10.1109/CCDC.2016.7531318

Zhang, W., Wu, Y., Calautit, J.K., 2022a. A review on occupancy prediction through machine learning for enhancing energy efficiency, air quality and thermal comfort in the built environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 167, 112704. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112704

Zhang, W., Wu, Y., Calautit, J.K., 2022b. A review on occupancy prediction through machine learning for enhancing energy efficiency, air quality and thermal comfort in the built environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 167, 112704. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112704

Zhang, Y., Bai, X., Mills, F.P., Pezzey, J.C.V., 2018. Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. Energy and Buildings 172, 279–294. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.017

Zhang, Y., Wang, Z., Zhou, G., 2013. Antecedents of employee electricity saving behavior in organizations: An empirical study based on norm activation model. Energy Policy 62, 1120–1127. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.036

Zierler, R., Wehrmeyer, W., Murphy, R., 2017. The energy efficiency behaviour of individuals in large organisations: A case study of a major UK infrastructure operator. Energy Policy 104, 38–49. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.033

Zou, P.X.W., Xu, X., Sanjayan, J., Wang, J., 2018. Review of 10 years research on building energy performance gap: Life-cycle and stakeholder perspectives. Energy and Buildings 178, 165–181. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.040

Annexe 1

Ci-dessous le questionnaire complet sur lequel s'est basée notre étude et qui est présenté dans la partie 1 du chapitre III avec ses différents volets.

MODIFIER LA PAGE DE BIENVENUE

Partie I : Faisons connaissance

2 à 4 minutes

SUIVANT

Partie I : Faisons connaissance

7 questions
2 à 4 minutes

Faisons connaissance

Saisissez une description

SEXE AGE

Bâtiment

Numéro de bureau

Fonction

Merci d'indiquer votre adresse e-mail

Please enter a number

Dans une journée type, combien de temps passez-vous dans votre espace de travail ?

Saisissez une description

Dans une journée type, à quelle heure arrivez-vous à votre espace de travail ?

Saisissez une description

Combien de temps passez-vous devant votre ordinateur ?

Une seule réponse est acceptée

- plus de 6 heures
- Entre 4 heures et 6 heures
- Moins de 4 heures

Sur une échelle de 1 à 5, comment jugez-vous votre esprit de compétition (5 étant un esprit de compétition très élevé)

Saisissez une description

Comment jugez-vous l'importance de l'image que vous dégagez vis-à-vis des autres ?

Maquette PSD créé par rawpixel.com - fr.freepik.com

- Aucune importance
- Peu important
- Neutre
- Important
- Très important

A quel point les encouragements et les remerciements sont importants pour vous ?

https://icon-library.com/icon/encouragement-icon-19.html.html

- Aucune importance
- Peu important
- Neutre
- Important

Très important

Partie II : Le bâtiment et vous

10 minutes

PRÉCÉDENT SUIVANT

Partie II : Le bâtiment et vous

28 questions

10 minutes

Saisissez une question

Saisissez une description

Savez-vous si vous pouvez changer la consigne de chauffage dans votre espace de travail ?

Saisissez une description

OUI NON

Dans le cas où vous avez la possibilité de changer la consigne de chauffage, savez-vous utiliser le boitier de chauffage dans votre espace de travail ?

Saisissez une description

- Oui, je connais la fonction de tous les boutons
- Je sais juste comment augmenter et diminuer la consigne
- Non pas du tout j'évite d'y toucher d'ailleurs

Dans votre espace de travail, l'ajustement de la température intérieure (thermostat) est contrôlé par ?

Une seule réponse est acceptée

- Seulement vous (vous êtes seul dans le bureau)
- Seulement vous (même si vous êtes plusieurs dans le bureau)

- Vous et une autre personne
- Vous et plusieurs autres personnes
- Une ou plusieurs autres personnes

Comment est prise la décision d'adapter la température de votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] Par vous-même (Vous êtes seul dans le bureau)
- [ ] Le gestionnaire du bâtiment décide
- [ ] Groupe de discussion
- [ ] La personne ayant le statut le plus élevé
- [ ] En répondant aux besoins de ceux qui expriment un inconfort
- [ ] La première personne qui s'exprime décide
- [ ] Chacun peut manipuler les appareils sans parler aux autres
- [ ] Je ne sais pas

Quelle motivation pourrait vous pousser à ajuster la température de votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] Assurer votre confort (Le bureau est très froid)
- [ ] Assurer votre confort (Le bureau est très chaud)
- [ ] Économiser de l'énergie

- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Autre, merci de préciser

Saisissez une question

Saisissez une description

Avez-vous le contrôle de l'éclairage de votre espace de travail ?

Saisissez une description

OUI NON

L'éclairage dans votre bureau:

Une seule réponse est acceptée

- ( ) Est tout le temps allumé
- ( ) Tout le temps éteint
- ( ) Cela dépend de la luminosité de la pièce

Quelle motivation vous pousserait à allumer l'éclairage dans votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- [ ] Besoin de plus de lumière dans mon espace de travail
- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Ecrivez une autre réponse

Quelle motivation vous pousserait à éteindre l'éclairage dans votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- [ ] J'ai assez de lumière dans mon espace de travail
- [ ] Économiser de l'énergie
- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Ecrivez une autre réponse

Saisissez une question

Saisissez une description

Avez-vous le contrôle des fenêtres de votre espace de travail ?

Saisissez une description

OUI NON

Cochez la réponse qui décrit le mieux leur état suivant les saisons :

Saisissez une description

	Tout le temps fermées	Tout le temps ouvertes	Ouvertes le matin, fermées l'après-midi
Saison de chauffage	○		○
Saison de climatisation	○		○
Intersaison (ni chauffage, ni climatisation)	○		○

En arrivant au travail, vous :

Saisissez une description

○ Ouvrez vos fenêtres ○ Fermez vos fenêtres

○ Laissez comme c'est

En quittant le travail, vous :

Saisissez une description

- Ouvrez vos fenêtres
- Fermez vos fenêtres
- Laissez comme c'est

Quelle motivation vous pousserait à ouvrir les fenêtres dans votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- [ ] Avoir de l'air frais
- [ ] Assurer votre confort (le bureau est très chaud)
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Économiser de l'énergie
- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Écouter les sons extérieurs
- [ ] Ecrivez une autre réponse

Quelle motivation vous pousserait à fermer les fenêtres dans votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- [ ] Je ne ferme pas la fenêtre
- [ ] Assurer mon confort (le bureau est très froid)
- [ ] Température extérieure trop froide/chaude
- [ ] Réduire les bruits extérieurs
- [ ] Économiser de l'énergie

- [ ] Éviter les polluants/insectes...
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Pour des raisons de sécurité
- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Ecrivez une autre réponse

Précisez l'état de la porte de votre bureau suivant les saisons :

Saisissez une description

	Tout le temps fermée	Tout le temps ouverte	Parfois ouverte parfois fermée
Saison de chauffage	○		○
Saison de climatisation	○		○
Intersaison (ni chauffage, ni climatisation)	○		○

Saisissez une question

Saisissez une description

Avez vous des occultants dans votre bureau ?

Saisissez une description

OUI NON

Quel type d'occultant ?

Saisissez une description

- Store vénitien intérieur
- Store vénitien extérieur
- Store enroulable intérieur
- Store enroulable extérieur
- Rideaux occultants

Cochez la réponse qui décrit le mieux l'état des occultants suivant les saisons :

Saisissez une description

	Tout le temps fermés	Tout le temps ouverts	Complètemen ouverts le matin et fermés l'après midi
Saison de			

Saison de chauffage	○	○	○
Saison de climatisation	○	○	○
Intersaison (ni chauffage, ni climatisation)	○	○	○

En arrivant au travail, vous :

Saisissez une description

- ○ Ouvrez les occultants
- ○ Fermez les occultants
- ○ Laissez comme c'est

En quittant le travail, vous :

Saisissez une description

- ○ Ouvrez les occultants
- ○ Fermez les occultants
- ○ Laissez comme c'est

Quelle motivation vous pousserait à ouvrir les occultants dans votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- ☐ Je ne les ouvre pas
- ☐ Laisser entrer plus de lumière naturelle
- ☐ Avoir la vue sur l'extérieur
- ☐ Réchauffer le bureau grâce au rayonnement solaire

- [ ] Économiser de l'énergie
- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Ecrivez une autre réponse

Quelle motivation vous pousserait à fermer les occultants dans votre espace de travail ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- [ ] Je ne les ferme pas
- [ ] Réduire l'éblouissement sur mon écran/espace de travail
- [ ] Réduire la surchauffe due au rayonnement solaire direct
- [ ] Répondre à la demande d'un collègue ou d'un manager
- [ ] Bloquer la vue depuis l'extérieur pour des raisons d'intimité
- [ ] Économiser de l'énergie
- [ ] Par habitude lors de l'arrivée / départ du bureau
- [ ] Ecrivez une autre réponse

Saisissez une question

Saisissez une description

Au bureau, utilisez-vous :

Saisissez une description

- ◯ Un ordinateur portable, sans écran supplémentaire
- ◯ Un ordinateur portable et une station d'accueil reliant un ou des écrans
- ◯ Un ordinateur fixe
- ◯ Un ordinateur fixe avec un ou plusieurs écrans supplémentaires
- ◯ Un ordinateur portable avec un ordinateur fixe
- ◯ Veuillez indiquer une autre réponse

Si vous travaillez avec un ordinateur fixe, en quittant le bureau :

Saisissez une description

- ◯ Vous éteignez l'ordinateur et le débranchez ?
- ◯ Vous éteignez l'ordinateur sans le débrancher ?
- ◯ Vous le mettez en veille ?
- ◯ Vous avez une multiprise que vous éteignez
- ◯ Vous ne pouvez pas éteindre à cause des instructions
- ◯ Vous ne faites rien
- ◯ Autre, merci de préciser

Si vous travaillez sur un ordinateur portable lié à un ou des écrans, en quittant le bureau :

Saisissez une description

- ◯ Vous éteignez les écrans et les débranchez ?
- ◯ Vous éteignez les écrans sans les débrancher ?
- ◯ Vous avez une multiprise que vous éteignez
- ◯ Vous ne faites rien
- ◯ Autre, Merci de préciser

Le mode économie d'énergie est-il activé sur votre ordinateur ?

Saisissez une description

- ◯ Oui
- ◯ Non
- ◯ Ne sais pas

Quelles sont les équipements électriques à disposition dans votre bureau ?

Saisissez une description

- ☐ Téléphones fixes
- ☐ Machine à café
- ☐ Photocopieuse / imprimante
- ☐ Autres équipements, merci de les

Avez-vous repéré dans votre bâtiment l'un des comportements suivants menant à des consommations inutiles d'énergie ?

Saisissez une description

- ☐ Éclairage allumé dans des salles vides

- [ ] Appareils allumés non utilisés
- [ ] Pièce chauffée et vide
- [ ] Ordinateurs allumés en fin de journée
- [ ] Prises non débranchées
- [ ] Climatisation dans des pièces vides
- [ ] Consigne de chauffage élevée
- [ ] Autre, Merci de nous en dire plus

Partie III : Le confort et vous

2 à 4 minutes

PRÉCÉDENT SUIVANT

Partie III : Le confort et vous

6 questions
2 à 4 minutes

Quel est votre ressenti général dans votre espace de travail ? Vous trouvez qu'il est ?

Merci de choisir une seule réponse

- Très chaud
- Chaud
- Légèrement chaud
- Ni chaud , ni froid
- Légèrement froid
- Froid
- Très froid

Lorsque vous subissez un inconfort thermique, quelles sont les causes les plus fréquentes ?

Vous pouvez choisir plus qu'une réponse

- [ ] Le thermostat n'est pas accessible ou contrôlé par d'autres personnes
- [ ] Les fenêtres ne sont pas accessibles ou contrôlées par d'autres personnes
- [ ] Mon espace de travail est plus chaud que les autres zones
- [ ] Mon espace de travail est plus froid que les autres zones
- [ ] La présence de courants d'air
- [ ] Les fenêtres sont trop proches de moi

- [ ] Les surfaces (murs, sols) autour de moi sont trop froides
- [ ] Les fenêtres sont trop éloignées de moi
- [ ] Les surfaces (murs, sols) autour de moi sont trop chaudes

Dans quelle mesure êtes-vous satisfait ou non des conditions suivantes ?

Saisissez une description

Température intérieure	😐
Qualité de l'air intérieur	😐
Éclairage artificiel	😐
Niveau sonore	😐

Quand vous avez froid, quel est votre premier réflexe ?

Vous pouvez choisir une seule réponse

Mettre un pull ou une veste	Fermer les fenêtres si elles sont ouvertes	Augmenter le chauffage	Vous ne faites rien

Seriez-vous prêt à travailler avec moins de confort afin de consommer moins d'énergie ?

Saisissez une description

1	2	3	4	5
Non, certainement pas				Oui, définitivement

En cas d'inconfort, essayez-vous de trouver d'autres solutions pour améliorer votre confort (Exemple : protection solaire en carton, etc ...). Si oui, citez-les ...

Saisissez une description

Partie IV : L'énergie et vous

5 minutes

PRÉCÉDENT SUIVANT

Partie IV : L'énergie et vous

11 questions

5 minutes

Quel terme associez-vous à la consommation d'énergie ?

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] kWh
- [ ] Prix
- [ ] Augmentation ou réduction de consommation énergétique
- [ ] Impact carbone (CO2)
- [ ] Autre, merci de préciser

Sur une échelle de 1 à 10, comment évaluez-vous votre niveau de connaissance des écogestes à adopter dans le bâtiment pour réduire les consommations d'énergie :

Saisissez une description

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Comment jugez-vous la façon avec laquelle vous consommez l'énergie quotidiennement dans votre espace de travail

Saisissez une description

Voulez-vous avoir des informations sur les consommations ?

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] Du bâtiment
- [ ] De votre bureau
- [ ] De votre bureau en comparaison à d'autres bureaux
- [ ] Cela ne vous intéresse pas
- [ ] Autre, merci de préciser

Quel format pour vous est le plus facile à manipuler ?

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] Des graphes visuels
- [ ] Des valeurs numériques
- [ ] Des images expressives
- [ ] Des mots et des explications

Autre, merci de préciser

A quelle fréquence effectuez-vous les actions suivantes de réduction des consommations dans les bureaux (jamais, rarement, parfois, souvent, toujours) :

Saisissez une description

Éteindre les lumières à chaque fois que vous quittez le bureau pour une durée de plus de 10 min	Parfois
Éteindre les lumières en fonction de la luminosité de la pièce	Parfois
Favoriser l'éclairage naturel	Parfois
Préférer des vêtements chauds à l'augmentation du chauffage	Parfois
Se renseigner sur les écogestes à adopter dans le bureau	Parfois
Éteindre l'ordinateur en fin de journée	Parfois
Mettre en veille l'ordinateur chaque fois que vous quittez votre bureau longtemps	Parfois

Débrancher les appareils
non utilisés

Réalisez-vous d'autres actions en dehors de celles-ci ? Lesquelles ?

Saisissez une description

Quelles autres actions pensez-vous être capables de réaliser dans le bureau ?

Saisissez une description

Dans le cas où vous ne réalisez pas certaines actions de réduction des consommations énergétiques dans le bureau, qu'est-ce qui vous en empêche ?

en empêche ?

Vous pouvez choisir plus qu'une réponse

- [ ] Ce n'est pas ma mission
- [ ] Manque d'intérêt
- [ ] Paresse
- [ ] Manque de temps
- [ ] Oubli
- [ ] Je ne suis pas seul dans le bureau
- [ ] Difficile de garder le rythme
- [ ] Autre, merci de préciser

Avez-vous un compteur Linky dans votre domicile ?

Saisissez une description

OUI NON

L'utilisez-vous pour suivre vos consommations ?

Une seule réponse est acceptée

- ( ) Oui
- ( ) Non
- ( ) Je ne sais pas l'utiliser

Serez-vous prêt à partager les données de vos consommations à des fins de recherche ?

Saisissez une description

OUI NON

Partie V : Vos intentions vs vos actions

5 minutes

PRÉCÉDENT SUIVANT

Partie V : Vos intentions vs vos actions

12 questions
5 minutes

Pourquoi selon vous est-il important de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments ?

Saisissez une description

Seriez-vous prêt à modifier votre comportement pour consommer moins d'énergie ?

Saisissez une description

1	2	3	4	5
Non, certainement pas				Oui, définitivement

Quel est votre ressenti envers les actions de réduction des consommations énergétiques dans les bâtiments ?

Vous pouvez choisir plusieurs réponses

- [ ] Moralement obligé
- [ ] Sentiment de culpabilité si vous ne les faites pas
- [ ] Bien si je les fais, mais aucun regret si je ne les fais pas
- [ ] Neutre

- [ ] Je n'en vois pas l'intérêt
- [ ] Autre, Merci de préciser

Si vous effectuez des écogestes dans le bâtiment c'est surtout pour (évaluez sur une échelle de 1 à 5 l'impact des propositions suivantes) :

Saisissez une description

Réduire l'impact environnemental	3
Ça fait partie de mes habitudes	3
C'est facile	3
Ça donne une bonne image de moi	3
Ça procure une satisfaction intérieure	3
Mon confort, sinon je ne le fais pas	3

Dans le bâtiment, y a-t-il des personnes qui effectuent des écogestes ?

Saisissez une description

- Oui
- Non
- Je ne sais pas

Voulez-vous les suivre ?

Saisissez une description

OUI NON

Si l'un de vos collègues adopte un écogeste pour réduire les consommations énergétiques dans le bâtiment, qu'en pensez-vous ?

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] Ça peut causer de l'inconfort
- [ ] C'est une perte de temps
- [ ] Rien
- [ ] C'est bien mais vous n'avez pas l'intention de faire de même
- [ ] C'est bien et vous essayez de suivre son exemple
- [ ] Autre, merci de préciser

Sur une échelle de 1 à 5, à quel point considérez-vous votre comportement comme écologique ?

Saisissez une description

1 2 3 4 5

A votre avis, les mesures de réduction des consommations énergétiques dans votre bâtiment sont de la responsabilité :

Vous pouvez choisir plus d'une réponse

- [ ] De tous les occupants, de leur propre initiative
- [ ] De tous les occupants, avec une politique dédiée et un suivi continu
- [ ] Du gestionnaire d'énergie dans le bâtiment avec des solutions
- [ ] De la Direction ou du gestionnaire du site
- [ ] Autre, merci de préciser

Parmi les propositions suivantes, choisissez celles qui, à votre avis, permettront un changement de comportement des occupants visant à réduire les consommations énergétiques dans votre bâtiment

Vous pouvez choisir plus qu'une réponse

- [ ] Informations sur les consommations de chacun
- [ ] Informations sur les écogestes à adopter
- [ ] Informations sur l'impact environnemental
- [ ] Rappels réguliers
- [ ] Une compétition

- [ ] Des remerciements
- [ ] Des récompenses
- [ ] Obligation
- [ ] Pénalité
- [ ] Autre, merci de préciser

Pensez-vous qu'en France les citoyens sont conscients des problèmes énergétiques et de la nécessité d'agir à l'échelle de chacun ?

Saisissez une description

- [ ] Oui
- [ ] Non
- [ ] Ne sais pas

Qu'est-ce qui pour vous peut bloquer le passage à l'action ?

Saisissez une description

Accepteriez-vous de recevoir une à deux fois par semaine des SMS de notre part pendant la période de l'expérimentation (2 mois). Si oui, merci d'indiquer votre numéro de téléphone :

Saisissez une description

Numéro de téléphone

SUBMIT

MODIFIER LA PAGE DE REMERCIEMENT

Annexe 2

Comme nous l'avons annoncé dans la partie 4 du chapitre III, voici ci-dessous les écogestes que nous avons rappelé aux occupants dans le cadre de l'expérimentation suivant chaque profil :

1)- Profil : Insoucieux

Nudges informatifs

Bienvenue dans cette aventure pour réduire tes consommations d'énergie dans le bureau !!

Voici quelques petits gestes que tu peux faire au quotidien pour réduire tes consommations d'énergie dans le bâtiment :

- **Ordinateur :**

1. Pense à activer le mode économie d'énergie sur ton ordinateur. Apparemment cela **permet de réduire de 10 à 40 %** la consommation de votre ordinateur. On pourrait le vérifier ensemble ☺

2. Pense à mettre en veille ton ordinateur quand tu prends une pause.
   Un ordinateur en veille utilise 20% à 40 % de l'équivalent de sa consommation en marche.

3. Pense à éteindre ton ordinateur en quittant le bureau, quand cela est possible pour toi, sinon tu pourrais te contenter du mode veille.
   En supposant une puissance minimale de 10 W de l'ordinateur, un ordinateur non éteint consomme **140 Wh par nuit** donc **700 Wh par semaine de travail** (sans compter le weekend) équivalent à 11 heures d'éclairage inutile !!

- **Écran :**

1. Pense à éteindre ton écran à chaque fois tu fais une pause. Pense aussi à le débrancher en fin de journée.
   Avec une consommation minimale de 5W, l'écran consomme en cas de non usage jusqu'à 350 Wh par semaine (hors weekend) : 6 heures d'éclairage inutile !!

- **Éclairage :**

1. Pense à favoriser l'éclairage naturel : Ouvre les stores pour profiter au maximum de la lumière !!!

2. Pense à éteindre les lumières à chaque fois que tu quittes ton bureau.
   1 heure d'éclairage économisée /jour = 60 Wh /jour

- **Chauffage :**

  Le basculement en mode inoccupé dans le bâtiment commence à 19h. On peut donc éviter quelques heures de chauffage inutiles entre le moment de quitter le bureau et 19h. De plus, des fois dans le bâtiment, le système ne bascule pas en

mode inoccupé et le chauffage continue de fonctionner avec la même consigne même la nuit !

Donc .... En quittant le bureau,

1. Pense à réduire la consigne de chauffage sur le boîtier au minimum (correspond à 16 °C). Il est préférable de le faire une heure avant de quitter le bureau.

   Consigne élevée / consigne moins élevée

2. Pense à basculer la vitesse du ventilateur à Auto afin de réguler la température en cas de besoin la nuit.

3. Ferme les stores, les fenêtres, et la porte pour éviter les déperditions de chaleur la nuit.

Au cours de la journée,

1. Commence par ouvrir les stores pour profiter de la chaleur provenant du soleil.

2. Choisis la consigne du milieu ou un peu plus bas si tu peux (21°C maximum). **Réduire de 1°C le chauffage pendant la journée permet d'économiser jusqu'à 7% de l'électricité totale.**

3. Pense à mettre des vêtements chauds avant d'augmenter le chauffage.

4. Maintiens la porte et les fenêtres fermées afin d'éviter les déperditions de chauffage.

5. Pense à éteindre le système avant d'ouvrir la fenêtre (fais basculer la vitesse de ventilation à 0)

6. Tu peux forcer l'arrêt du système en mettant la vitesse de ventilation sur 0 quand tu n'utilises pas le chauffage

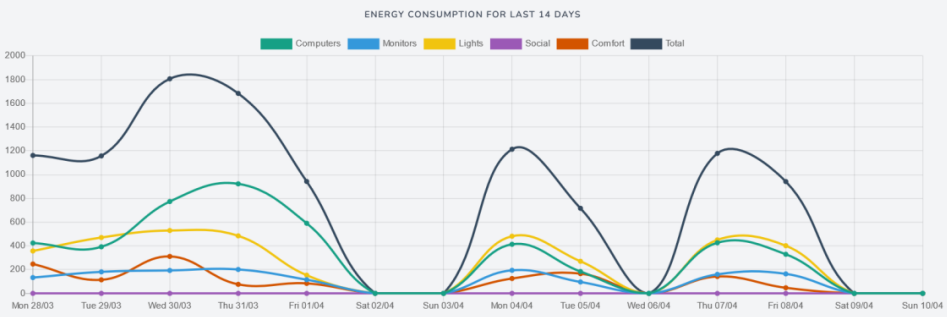
- **Autres équipements :**

1. Pense à éteindre et débrancher tous les équipements électriques une fois l'usage terminé (machine à café, bouilloire, autre, ...)

1)- Profil : Insoucieux

Nudges Feedback + Reconnaissance

Consumption tracking



Ci-dessus vos consommations pour les deux dernières semaines du 29/03 au 08/04

Votre moyenne de consommation journalière est de : 1200 Wh
Maximum de consommation: 1806 Wh le Mercredi 30/03

Vous pouvez consulter sur le graphe les consommations de chaque poste:

- Lights: Eclairage
- Computers: Unité Centrale
- Monitors: Ecran
- Social: Bouilloire
- Comfort: Purificateur d'air

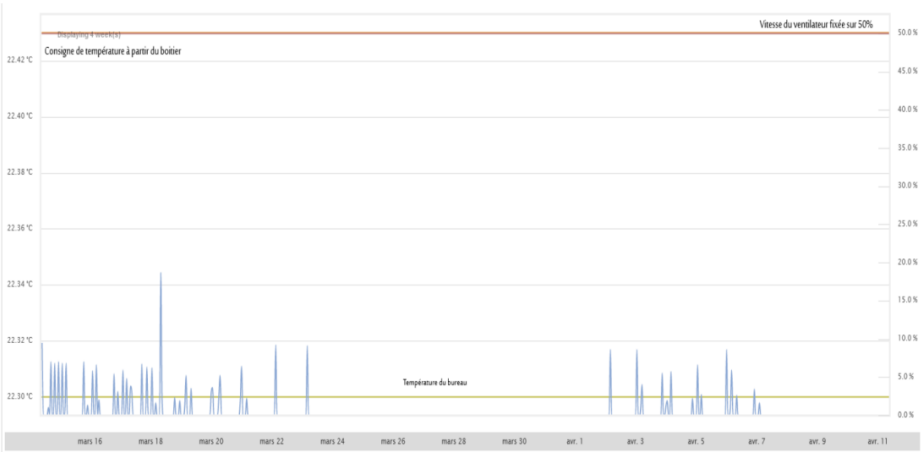
- La consommation d'éclairage peut être réduite à 350 Wh /jr en considérant un usage de 6h. Pensez à éteindre l'éclairage si vous avez assez de lumière dans le bureau et à chaque fois que vous quittez votre bureau.

- Pensez à éteindre les appareils électriques en cas de non usage

- **Bravo !!!** Continuez à éteindre ou mettre en veille votre ordinateur en quittant le bureau 👏

- Pensez à éteindre votre écran à chaque fois que vous ne l'utilisez pas (pause, en quittant le bureau).
Consommation moyenne écrans: 160 Wh/jr ce qui correspond à 8h d'allumage journalier.

- **Système de chauffage :**



- Le système de chauffage ne s'arrête pas la nuit
- La consigne de température est maintenue à 22.5 °C et la vitesse de ventilation est de 50% tout le temps.

Pensez à éteindre le chauffage une heure avant de quitter le bureau en choisissant une vitesse de ventilation de 0% afin d'empêcher le fonctionnement du système. **Cela évitera 14h de chauffage inutile !!**

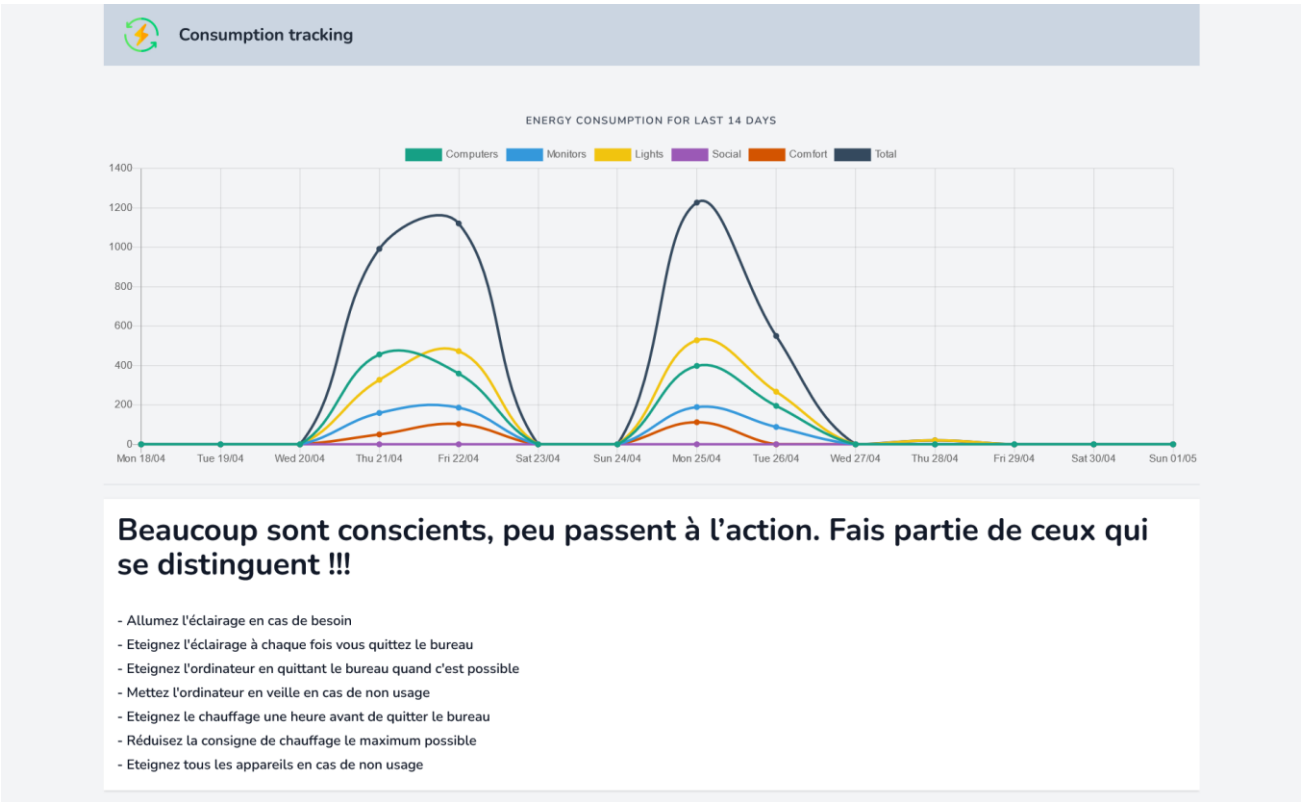
Vous pouvez réallumer le lendemain quand vous rentrez au bureau.

ps: Bien entendu , effectuez ces écogestes tout en respectant votre confort et le maintien de bonnes conditions de travail.

En attendant Vos prochaines consommations, ...

1)- Profil : Insoucieux

Nudges Feedback + Reconnaissance



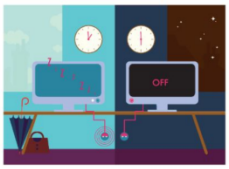
2)- Profil : Qui favorise le confort

Nudges Informatif : rappels : Stickers

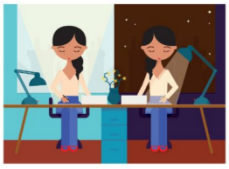
Consumption tracking

Rappel écogestes au bureau

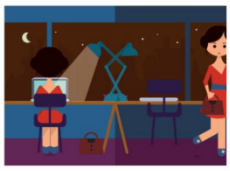
- Activer le mode économie d'énergie
- Mettre l'ordinateur en veille en cas d'absence et l'éteindre en quittant le bureau
- Éteindre l'écran en cas de non usage



- Favoriser l'éclairage naturel



- Eteindre l'éclairage en quittant le bureau

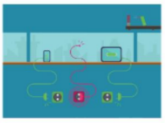


- Réduire la consigne de chauffage et favoriser les vêtements chauds (et vice versa en période de climatisation)

- Eviter d'ouvrir les fenêtres si le chauffage est allumé

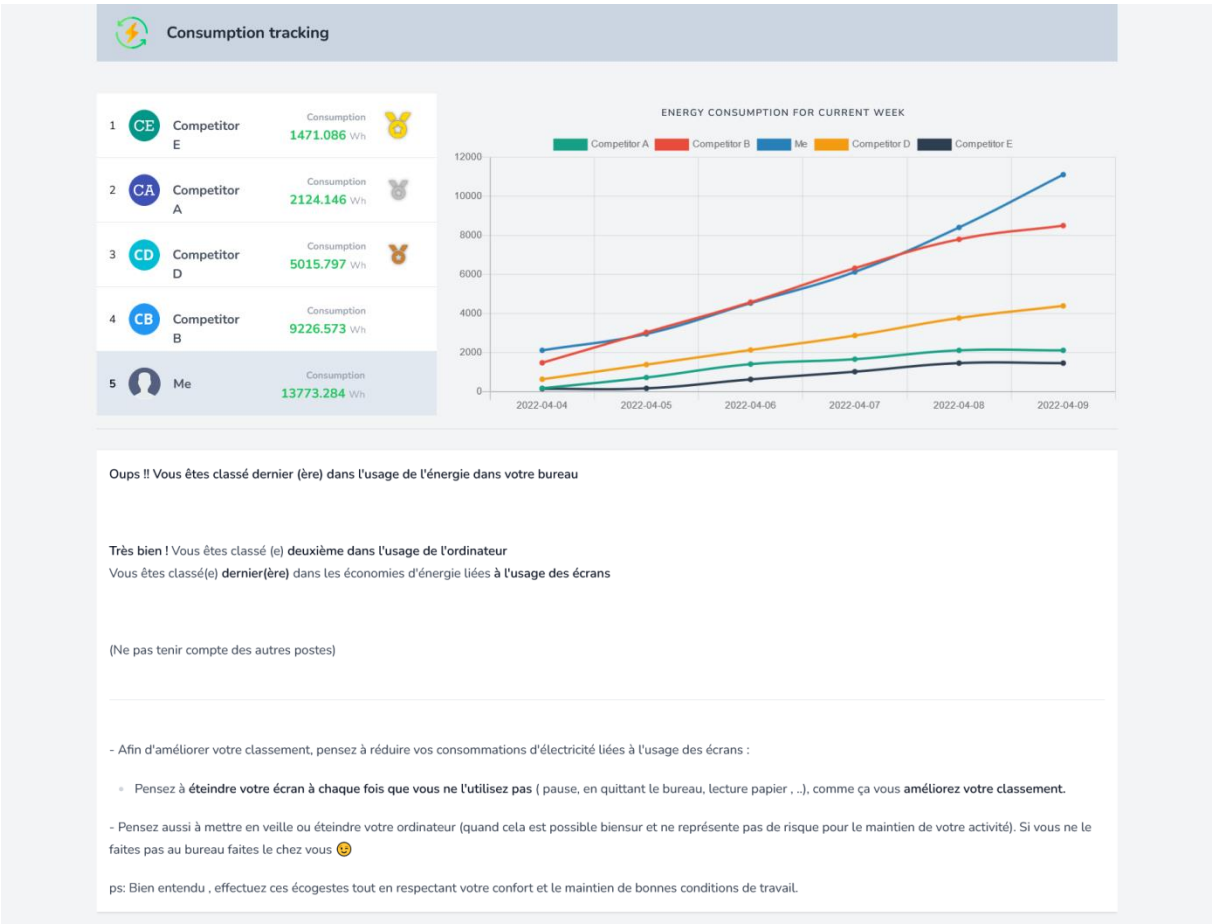
- Eteindre le chauffage une heure avant de quitter le bureau

- Débrancher les prises inutilisées



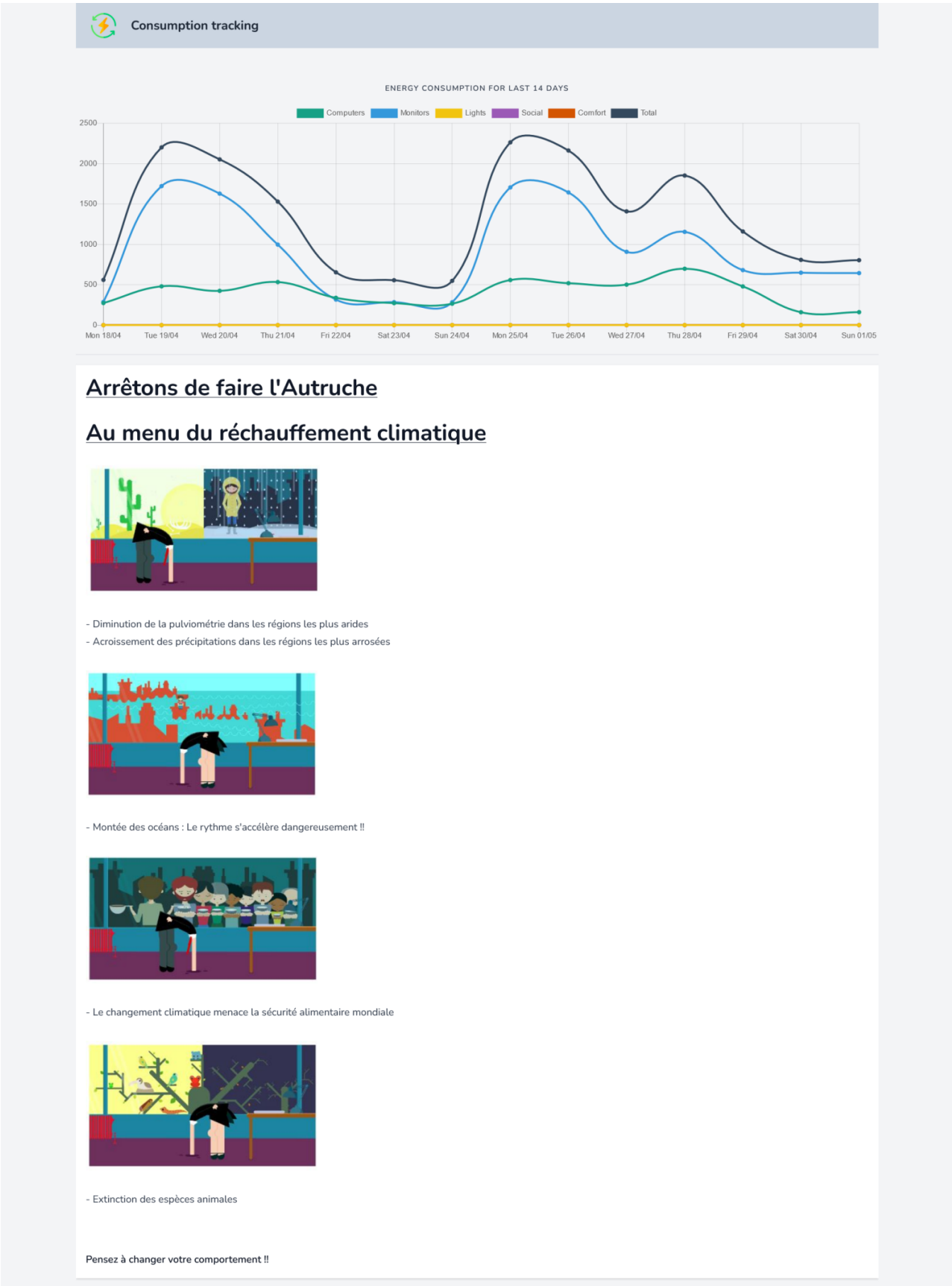
2)- Profil : Qui favorise le confort

Nudges de compétition



2)- Profil : Qui favorise le confort

Nudges de feedback+ Appel moral



Annexe 3 : Questionnaire Post Expérimentation

Le questionnaire Post Expérimentation est une étape importante afin d'avoir un retour de la part des occupants par rapport à l'expérimentation, son déroulé et son efficacité. Ci-dessous le questionnaire post Expérimentation complet :

Qu'en pensez Vous ?

Je vous remercie de votre participation au défi de réduction des consommations dans les bureaux. Voici un formulaire rapide pour avoir votre avis sur cette expérience.

1. Merci d'indiquer le numéro de votre bureau (L'anonymat sera maintenu) (La réponse n'est pas obligatoire mais permet de vérifier l'efficacité des solutions proposées)

2. Sur une échelle de 1 à 5, comment jugez-vous l'efficacité des informations que vous avez reçues ?

   Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5
	○	○	○	○	○

3. Au cas où des stickers ont été collés dans votre bureau, comment jugez-vous leur utilité comparés aux rappels écrits encourageant les écogestes ?

   Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
Moi	○	○	○	○	○	Plus utiles

4. Au cas où des stickers ont été collées dans votre bureau, évaluez sur une échelle de 1 à 5 leur impact sur les visiteurs du bureau :

   Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5
	○	○	○	○	○

5. Dans les messages que vous avez reçus, quel format avez-vous appréciez plus ?

Plusieurs réponses possibles.

- ☐ Les images
- ☐ Les messages écrits
- ☐ Les graphes
- ☐ Les deux
- ☐ Autre : _____

6. Sur une échelle de 1 à 5, comment jugez-vous l'impact de cette expérience sur la réduction de vos consommations d'énergie dans le bureau ?

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
Nég	○	○	○	○	○	Positif

7. Sur une échelle de 1 à 5, comment jugez-vous l'impact de cette expérience sur la réduction de vos consommations d'énergie chez vous ?

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
Nég	○	○	○	○	○	Positif

8. Notez à quelle point les déclarations suivantes sont vraies :

Une seule réponse possible par ligne.

	Fausse	Partiellement fausse	Ne sais pas	Partiellement vraie	Vraie
La présence de capteurs a causé un dérangement					
L'expérience a nui à mon confort					
L'expérience m'a fait perdre du temps					
Le nombre de messages reçus était excessif					

9. Quelles incitations reconnaissez-vous de celles que vous avez reçues ? Évaluez sur une échelle de 1 à 5 leur efficacité :

Plusieurs réponses possibles.

	1	2	3	4	5
Informations écogestes	☐	☐	☐	☐	☐
Images écogestes	☐	☐	☐	☐	☐
Encouragements	☐	☐	☐	☐	☐
Compétition	☐	☐	☐	☐	☐
Exemple à suivre	☐	☐	☐	☐	☐
Conscience environnementale	☐	☐	☐	☐	☐

10. Sur une échelle de 1 à 5, comment évaluez-vous le moyen de communication utilisé (Site web) ?

Une seule réponse possible.

1	2	3	4	5
○	○	○	○	○

11. Comment évaluez-vous votre niveau de connaissance actuel des écogestes dans le bureau ?

Une seule réponse possible.

1	2	3	4	5
○	○	○	○	○

12. Sur une échelle de 1 à 5, évaluez le niveau de réalisation des écogestes suivant dans le bureau :

Plusieurs réponses possibles.

	1	2	3	4	5
Réduire la consigne de chauffage	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre le chauffage en quittant le bureau	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre le chauffage une heure avant de quitter le bureau	☐	☐	☐	☐	☐
Fermer les portes et les fenêtres pour éviter les déperditions de chaleur	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre l'éclairage à chaque fois vous quittez le bureau	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre l'éclairage en quittant le bureau le soir	☐	☐	☐	☐	☐
Favoriser l'éclairage naturel	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre l'ordinateur en quittant le bureau	☐	☐	☐	☐	☐

quand c'est possible					
Éteindre l'écran en quittant le bureau	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre l'écran en cas de non usage	☐	☐	☐	☐	☐
Éteindre et débrancher les appareils après chaque usage	☐	☐	☐	☐	☐
Réduire le gaspillage d'énergie du au numérique	☐	☐	☐	☐	☐

13. Avez-vous des remarques pour améliorer cette expérience au futur pour plus d'efficacité ?

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel, les efforts de réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments doivent prendre en compte de nombreux paramètres, le bâtiment, son environnement, ses équipements et surtout le comportement de ses utilisateurs. Les nudges, issus de l'économie comportementale et trouvant des applications dans divers domaines (financier, alimentation, santé, etc.), ont notamment été explorés dans le contexte environnemental en général, et spécifiquement dans celui de la consommation d'énergie dans les bâtiments. L'objectif de notre travail est de mettre en œuvre des comportements d'économie d'énergie par le biais de nudges dans un bâtiment et de mesurer leur impact à l'aide de compteurs intelligents.
Notre approche implique des simulations thermiques dynamiques, l'utilisation de capteurs connectés et la création de profils d'occupants par le biais de questionnaires. Ces éléments sont généralement traités de manière individuelle et isolée dans la littérature. Nous évaluons d'abord de façon théorique les écogestes qui ont l'impact le plus significatif dans la réduction des consommations d'énergie dans un bâtiment tertiaire public situé en France. Nous créons un cadre basé sur des théories psychologiques et des travaux antérieurs afin de définir des concepts sur lesquels nous nous basons pour définir différents profils de consommateurs d'énergie. Nous menons une expérimentation afin de mesurer, à l'aide de compteurs intelligents, l'impact de l'utilisation de nudges sur le changement de comportement des occupants.
La simulation de différents types d'utilisation de l'énergie dans un même bâtiment est également intéressante pour étudier l'impact du comportement des occupants sur la consommation d'énergie et la manière dont l'utilisation d'incitations personnalisées pour sensibiliser et favoriser l'adoption d'économies d'énergie peut conduire à une réduction significative de la consommation d'énergie dans le bâtiment.
Les résultats obtenus sont positifs en ce qui concerne les gains en énergie à condition qu'une connaissance préalable des occupants soit établie.

MOTS CLÉS

Nudges ; Objets connectés ; Comportement des occupant ; Simulations thermiques dynamiques ; Consommations énergétiques

ABSTRACT

In the current context, efforts to reduce energy consumption in buildings must take into consideration a wide range of parameters, the building, its environment, its equipment and, above all, the behavior of its users. Nudges, which emerged from behavioral economics and find applications in various fields (finance, food, health, etc.), have been explored in the environmental context in general, and specifically in that of energy consumption in buildings. The aim of our work is to implement energy-saving behaviors through nudges in a building and to measure their impact using smart meters. Our approach involves dynamic thermal simulations, the use of smart meters, and the creation of occupant profiles through questionnaires. These elements are typically addressed individually and isolated in the literature.
We start with a theoretical assessment of the energy-saving actions that have the most significant impact in reducing energy consumption in a public tertiary building located in France. We create a framework based on psychological theories and previous works to define concepts that we use to define different energy consumers profiles. We conduct an experimentation using smart meters to measure the impact of nudges on behavioral change among occupants. Simulating different types of energy use scenarios in the same building is also interesting for studying the impact of occupants' behavior on energy consumption, and how the use of tailored incentives to raise awareness and encourage the larger adoption of energy savings measures can lead to a significant reduction in energy consumption in the building. The results obtained are positive in terms of energy savings, provided that prior knowledge of occupants is established.

KEYWORDS

Nudges ; IoT ; Occupant's behavior ; Thermal dynamic simulation, Energy consumption