

Table des matières

| | | |
|-------------|---|-----------|
| I. | <i>Introduction</i> | 3 |
| 1. | Contexte | 3 |
| 2. | Objectifs de la thèse | 7 |
| II. | <i>Etat de l'art en matière de connaissance du parc tertiaire français</i> | 9 |
| 1. | L'hétérogénéité du parc de bâtiments tertiaires | 9 |
| 2. | Les différentes méthodes de modélisation d'un parc de bâtiments | 11 |
| 3. | Synthèse de l'étude des modèles existants | 18 |
| III. | <i>Méthodologie - Reconstitution et enrichissement du parc</i> | 21 |
| 1. | Etape 1 : Collecte de données | 23 |
| 2. | Etape 2 : Identification des bâtiments et estimation de surface | 30 |
| 2.1. | Identification des bâtiments abritant des activités tertiaires avec le SIG | 30 |
| 2.2. | Méthodes d'estimation des surfaces | 36 |
| 2.3. | Eléments de validation par sondage in situ | 43 |
| 2.4. | TraITEMENT DES PROBLÈMES SPÉCIFIQUES : siègeS SOCIAUX, SITEs MULTI-BÂTIMENTS ET ABSENCE DE DONNÉES GÉOMÉTRIQUES | 50 |
| 3. | Etape 3 : Caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments | 52 |
| 3.1. | Distribution de la date de construction | 53 |
| 3.2. | Distribution de la date et la nature des derniers travaux | 56 |
| 3.3. | Distribution du taux de vitrage | 57 |
| 3.4. | Calcul de la surface mitoyenne et la surface déperditive | 58 |
| 3.5. | Estimation de la forme et de la surface de toiture | 59 |
| 3.6. | Calcul des masques solaires | 60 |
| 3.7. | Distribution des coefficients de transfert thermique U et du débit d'infiltration | 60 |
| 4. | Etape 4 : Enrichissement des données des systèmes énergétiques | 62 |
| 4.1. | Les usages importants à modéliser | 62 |
| 4.2. | Présence des usages au sein de chaque bâtiment | 65 |
| 4.3. | Distribution des sources d'énergie | 67 |
| 4.4. | Caractérisation des systèmes | 73 |
| 5. | Etape 5 : Caractérisation des profils d'occupation | 83 |
| IV. | <i>Résultats, comparaisons et analyse de sensibilité</i> | 90 |
| 1. | Résultats concernant la description du parc | 90 |
| 1.1. | Quelques illustrations des résultats : description des surfaces | 90 |
| 1.2. | Comparaison de notre évaluation des surfaces avec les sources externes | 101 |
| 2. | Résultats concernant la consommation d'énergie | 109 |
| 2.1. | Comparaison des résultats de la simulation énergétique avec des sources externes | 109 |
| 2.2. | Quelques illustrations des résultats : courbes de charge | 116 |
| 3. | Analyse de sensibilité et discussion des hypothèses | 119 |
| 3.1. | Analyse de sensibilité des paramètres de la reconstitution du parc | 119 |
| 3.2. | Analyse des hypothèses de la simulation énergétique | 122 |
| 3.3. | Discussion des hypothèses | 126 |

| | |
|--|------------|
| V. Applications de la méthode de reconstitution du parc | 127 |
| 1. Evaluation des gisements d'économie d'énergie pour le chauffage en Île-de-France | 127 |
| 2. Evaluation du potentiel d'autoconsommation photovoltaïque des bâtiments du secteur tertiaire dans l'Agglomération d'Orléans | 134 |
| VI. Conclusion et Perspectives | 141 |
| VII. Bibliographie | 148 |
| VIII. Annexes | 152 |
| 1. Liste des figures | 152 |
| 2. Liste des tableaux | 155 |
| 3. Tableaux et figures annexes | 157 |

I. Introduction

1. Contexte

L'efficacité énergétique et la décarbonation des usages de l'énergie dans le secteur du bâtiment constituent un enjeu capital dans le cadre de la stratégie nationale de réduction des émissions de gaz à effet de serre, principal levier de lutte contre le changement climatique. En 2019, les bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire suscitent en effet à eux seuls 45% de la consommation finale d'énergie du territoire métropolitain français et 21% des émissions directes de CO₂ [1].

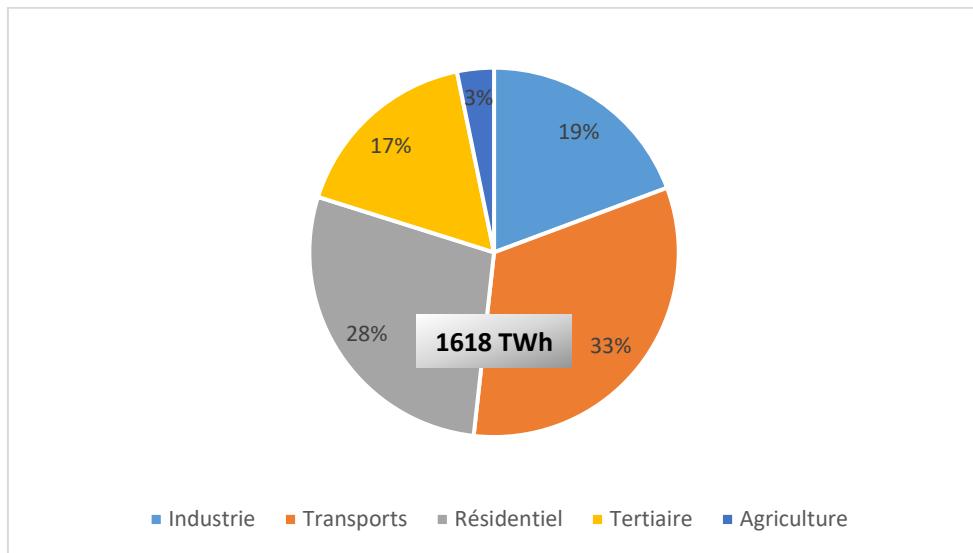


Figure 1: Répartition par grand secteur de la consommation finale d'énergie en 2019 (source : [2])

La consommation d'énergie des bâtiments du secteur résidentiel et ses déterminants sont assez largement documentés [3]. Il en va tout autrement pour les bâtiments du secteur tertiaire, qui tout comme l'industrie diffuse restent méconnus. Ils engendrent pourtant désormais 17% de la consommation d'énergie finale d'énergie (voir Figure 1), à la suite d'une rapide croissance consécutive à la tertiarisation de l'économie française.

Comparée à celle des autres grands secteurs, la consommation d'énergie du secteur tertiaire est marquée par le poids de la consommation d'électricité, qui résulte principalement de l'importance des usages dits « spécifiques », c'est à dire ne pouvant être satisfaits dans la pratique qu'au moyen de l'électricité.

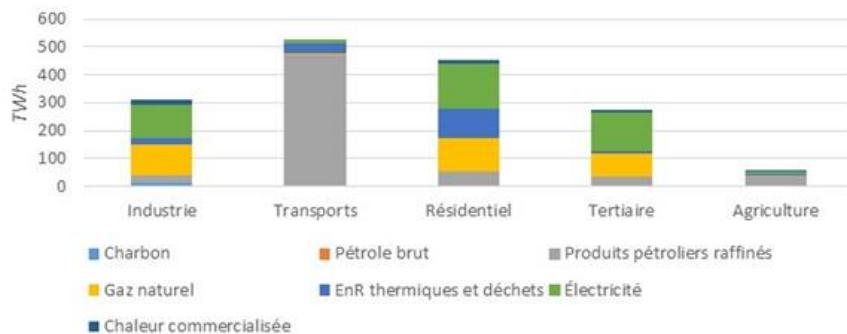


Figure 2: Consommation finale d'énergie par grand secteur et par source d'énergie en 2019 (source : [2])

Une analyse en décomposition a été réalisée par EDF R&D selon la méthode LMDI (Logarithmic Mean Divisia). Cette analyse permet d'évaluer la contribution de différents types de déterminants à l'évolution

de la demande d'énergie du secteur tertiaire¹, sur la base de données INSEE (économie) et CEREN (surfaces de bâtiments et consommations d'énergie par type d'activité, source d'énergie et usage de l'énergie). Les déterminants mis en évidence sont au nombre de 5 :

- L'activité économique par type d'activité (ci-après « Activité »), approchée par la Valeur Ajoutée des secteurs (avec toutes les réserves d'usage concernant l'évaluation de cette grandeur s'agissant des services principalement non marchands),
- La productivité du travail par type d'activité (ci-après « Productivité »), approchée par le rapport de la valeur ajoutée et des emplois.
- La surface par emploi par type d'activité (ci-après « SurfEmp »),
- Le pourcentage de la surface chauffée pour un type d'activité, satisfait au moyen d'un source d'énergie donné pour un usage donné (ci-après « SurfEnerg »). Cet indicateur cumule les contributions des évolutions des parts de marché pour les usages concurrentiels (chauffage, ECS) et du taux d'équipement pour la seule climatisation.
- L'intensité énergétique, à savoir la consommation d'énergie par unité de surface, par type d'activité, source d'énergie et usage de l'énergie (ci-après « Intensité »).

La figure 3, qui présente l'influence de ces 5 grands déterminants pour l'ensemble du secteur tertiaire, tous usages et toutes sources d'énergie confondues, montre la prépondérance des facteurs économiques (activité, productivité, dans une moindre mesure surface par emploi), qui influencent l'évolution du parc de bâtiments.

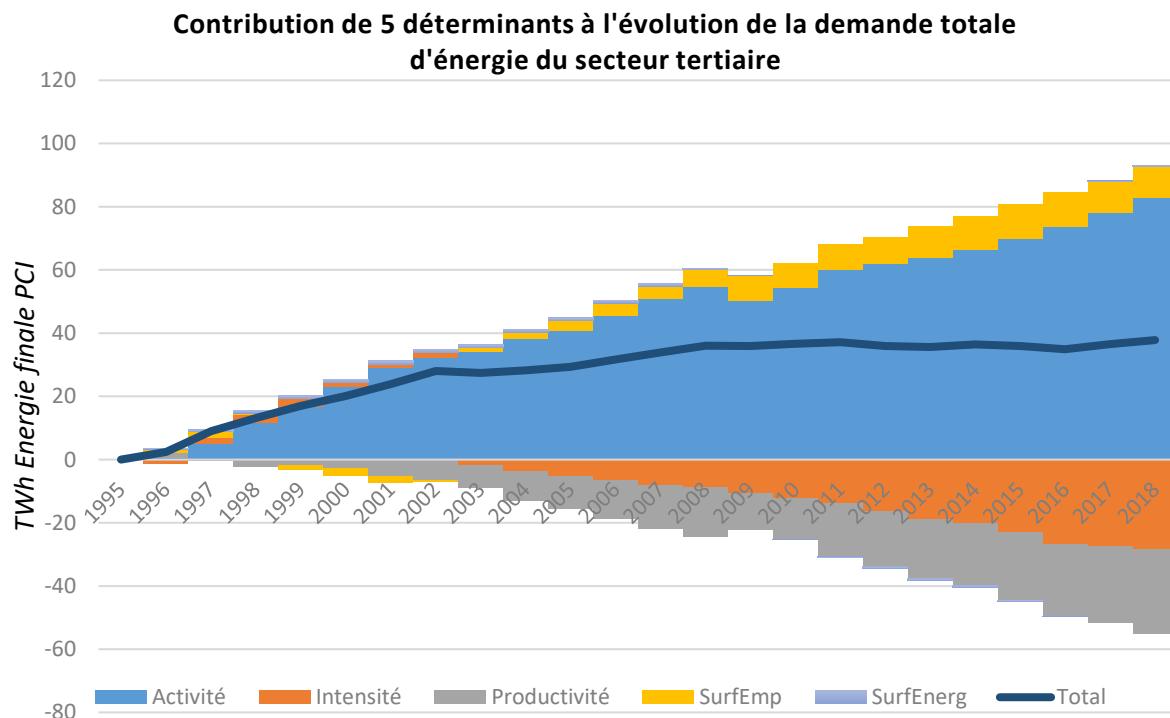


Figure 3: Décomposition des déterminants de la demande d'énergie du secteur tertiaire

Elle montre également qu'un changement de tendance s'est opéré au tournant des années 2000, avec l'amorce d'une baisse de l'intensité énergétique. Or, cette période correspond précisément à l'entrée en

¹ Etude conduite au périmètre des 8 branches documentées par le CEREN au travers de ses études récurrentes : bureaux, cafés-hôtels-restaurants, commerces, santé, enseignement, habitat communautaire, sports-culture-loisirs et transport.

vigueur de la réglementation thermique RT2000, considérée pour le secteur tertiaire comme la première réglementation réellement contraignante, en ce qu'elle prescrivait des niveaux de performances thermiques supérieurs aux pratiques spontanées.

Les résultats de l'analyse par source d'énergie (Figure 4), tous types d'activités et usages confondus, illustrent quant à eux les conséquences sur la consommation globale de l'évolutions de leurs parts de marché et leurs spécificités.

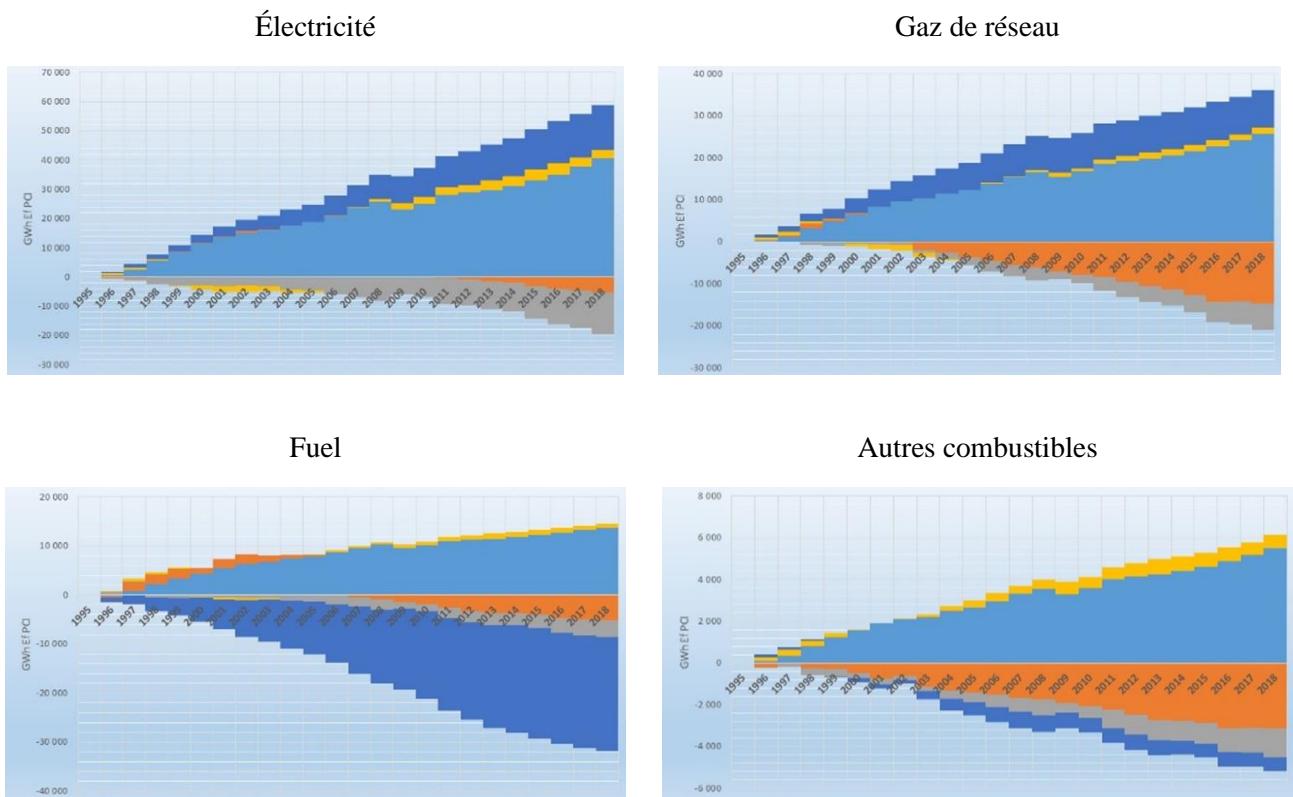


Figure 4: Décomposition des déterminants de la demande d'énergie du secteur tertiaire par sources d'énergie

Ces résultats illustrent la complexité du processus de formation de la demande d'énergie. En particulier, l'influence de la part de marché et de l'intensité énergétique souligne l'importance des déterminants directement liés aux bâtiments, à leurs caractéristiques, aux systèmes qui les équipent et à la façon dont ils sont utilisés. Ils ont permis par le passé de limiter l'augmentation de la consommation d'énergie dans un contexte de forte croissance de l'activité et de recours accru aux usages spécifiques de l'électricité (micro-informatique, éclairage, ...). Quels potentiels de modération ou de décroissance sont disponibles aujourd'hui et à moyen terme ? Comment les réaliser ? Répondre à ces questions requiert une connaissance précise du parc de bâtiments (surfaces, état thermique) et de son usage (activités, systèmes et équipements, utilisations et efficacités associées).

L'enjeu crucial de l'hétérogénéité

La méconnaissance de la consommation d'énergie du tertiaire et de ses déterminants a deux explications principales. La première tient à la difficulté de cerner précisément les contours et la nature du secteur tertiaire lui-même : de quoi parle-t-on quand on parle de tertiaire ? La seconde, directement liée à la précédente, tient à l'extrême hétérogénéité du secteur. Ces deux pierres d'achoppement ont sans doute contribué à minorer l'attention historiquement portée au secteur, souvent jugé inextricable.

La première de ces difficultés, celle du contour et de la nature des activités rattachées au secteur tertiaire, trouve une solution acceptable à défaut d'être élégante *via* l'énumération des activités économiques et sociales dont on décide qu'elles composent le secteur tertiaire.

La seconde, l'hétérogénéité, s'exprime précisément quant à elle au niveau des déterminants de la demande d'énergie :

- Hétérogénéité des activités, dont la nature et les rythmes (cycles d'activité) sont extrêmement variés et conditionnent la demande d'énergie : quoi de commun entre une école maternelle et un centre commercial ? Une résidence pour personnes âgées dépendantes et une salle omnisports ?
- Hétérogénéité des bâtiments et des équipements (dimensions, performances thermiques, rendements, consommation auxiliaires...), qui constituent les plus visibles des infrastructures supports des activités de service et déterminent directement la consommation de la majeure partie des usages de l'énergie du tertiaire (chauffage, climatisation, ventilation, éclairage notamment).
- Hétérogénéité de la répartition spatiale et temporelle des bâtiments (centres urbains, périphérie, zone rurale) et des conditions climatiques auxquels ils sont soumis.

Puisqu'elle concerne précisément les déterminants de la demande d'énergie, la prise en compte de cette hétérogénéité est un prérequis absolu à la conception et au déploiement des politiques d'efficacité énergétique, de même qu'à toute planification ou prospective énergétique. La définition des politiques d'efficacité énergétique suppose par exemple d'être en capacité d'identifier les gisements d'économie d'énergie, de les quantifier et de définir une stratégie d'exploitation de ces gisements. En effet, les moyens de parvenir à une efficacité énergétique satisfaisante ne sont pas du tout les mêmes selon qu'à performance moyenne donnée on considère un parc homogène ou hétérogène : dans le premier cas, l'ensemble du parc doit être traité et peut l'être de façon indifférenciée. Dans le second cas, il est possible et nécessaire de moduler les politiques et d'identifier des cibles prioritaires, appelant des actions et des efforts spécifiques.

Or, il n'existe pas à l'heure actuelle de représentation du parc de bâtiments tertiaires français qui satisfasse l'impératif de prise en compte de son hétérogénéité. Les données disponibles permettent au mieux de représenter le parc de bâtiments sous la forme d'une estimation des surfaces chauffées, segmentées par types d'activités et énergie principale de chauffage, et d'évaluer sa consommation d'énergie à partir de ratios établis statistiquement à partir d'enquêtes.

Le développement récent de l'open data et la multiplication de sources de données ont ouvert de nouvelles perspectives et permettent d'envisager de nouvelles façons de représenter le parc de bâtiments tertiaire et ses caractéristiques en tenant compte de son hétérogénéité.

2. Objectifs de la thèse

L'objectif de la thèse est d'établir un corps méthodologique permettant de reconstituer la population des bâtiments du parc tertiaire français et de la représenter sous la forme d'une collection d'individus, dont les caractéristiques et celles de leurs occupants permettent une simulation techniquement explicite de leur demande d'énergie.

La méthodologie doit :

- pouvoir couvrir l'ensemble du territoire métropolitain français,
- être applicable à des échelles spatiales variant de la commune au territoire métropolitain français,
- reposer dans la mesure du possible sur des données et outils communément accessibles.

Après avoir identifié et caractérisé les données disponibles, le principe général du travail est de confronter divers référentiels afin d'identifier les bâtiments tertiaires dans un ensemble urbain et de leur associer les activités adéquates. Dans un second temps, l'exploitation de diverses sources de données (statistiques, revues, publications, enquêtes) doit permettre d'enrichir la description de chacun des bâtiments, c'est-à-dire d'affecter une valeur à chacun des attributs nécessaires à la simulation énergétique.

De façon générale, chaque source de données publiée a été collectée au titre d'une finalité et selon une méthodologie propre aux commanditaires. Le rapprochement et l'harmonisation de différentes sources de données se heurtent ainsi aux difficultés qui naissent de la confrontation de finalités et de méthodologies différentes.

Dans le cas qui nous intéresse, les questions-clés auxquelles doit être apportée une réponse sont les suivantes :

- *Comment évaluer les surfaces des bâtiments et celles dévolues aux différents types d'activités du tertiaire dans chacun des bâtiments ?*
- *Existe-t-il des règles d'attribution de caractéristiques thermiques à chaque bâtiment, sachant que certains peuvent avoir fait l'objet de rénovations ?*
- *Comment affecter des sources d'énergie et des systèmes aux différents bâtiments, en particulier pour les usages thermiques (chauffage, climatisation, ECS) ?*

Enfin, le problème de la validation des estimations de consommation d'énergie devra être abordé, tout en gardant à l'esprit le fait que nos travaux sont parmi les premiers consacrés au secteur tertiaire et qu'il n'existe donc quasiment aucune donnée de référence en dehors d'enquêtes purement déclaratives.

Il faut insister sur le fait que notre objectif n'est pas de reconstituer le parc français réel à l'échelle de chaque bâtiment. En l'état actuel des choses, il serait illusoire de penser que l'une des bases statistiques puisse garantir cette exactitude à la granularité du bâtiment. Nous visons plutôt la possibilité de reconstituer un parc de bâtiments homologue du parc réel à l'échelle de la commune ou du territoire. En d'autres termes, on ne saura dire si tel bâtiment particulier est chauffé au gaz et tel autre à l'électricité, avec une chaudière neuve ou ancienne, etc., mais à l'échelle agrégée du territoire la répartition entre systèmes et source d'énergie devra être statistiquement correcte.

Nous souhaitons également établir la faisabilité et la pertinence de l'approche en déroulant l'intégralité du processus qui, partant de la collecte de données généralement accessibles, aboutit à la simulation techno-explicite de la demande d'énergie du parc de bâtiments du secteur tertiaire. C'est pourquoi nous n'hésiterons pas à énoncer des hypothèses pour certaines données mal connues, laissant ainsi un champ

d'approfondissement pour les vérifier ou les affiner dans l'avenir (programmation d'enquêtes de terrain par exemple).

Dans une première partie, nous établirons un état de l'art concernant les représentations du parc de bâtiments du secteur tertiaire, ce qui permettra d'établir l'originalité de notre approche.

Dans une seconde partie, nous décrirons les étapes de la reconstitution du parc, dont chacune contient des méthodes, des hypothèses et des règles d'expert pour donner des réponses aux questions-clés ci-dessus.

Dans une troisième partie, nous établirons des comparaisons entre nos résultats de simulation et des données locales provenant de diverses sources. A cette occasion, nous chercherons à valider le corps méthodologique.

La quatrième partie sera consacrée à la présentation de deux cas d'application :

- Gisement d'économie d'énergie sur le parc tertiaire de la Région Île-de-France
- Potentiel d'autoconsommation photovoltaïque de l'Agglomération d'Orléans

Enfin, nous conclurons ce travail de thèse par une analyse critique des points forts, des limites et du potentiel d'amélioration de notre approche.

II. Etat de l'art en matière de connaissance du parc tertiaire français

1. L'hétérogénéité du parc de bâtiments tertiaires

L'hétérogénéité du secteur tertiaire en général et son parc de bâtiments en particulier résulte de la diversité d'activités économiques que ce secteur englobe. D'où une première question : *Comment pouvons-nous définir le secteur tertiaire ?*

Cette question ramène aux sciences économiques où existent plusieurs visions de la séparation en trois grands secteurs. La définition du secteur tertiaire commence à apparaître dans la littérature lors des travaux d'Allan Fisher [4] et de Colin Clark [5]. Les deux ont constaté un glissement de la population active vers les métiers de services. Ils proposent une division de la structure économique en trois secteurs d'activité : Primaire, Secondaire et Tertiaire. Secteurs primaire et secondaire font seuls l'objet d'une définition positive : au secteur primaire les activités de type agricole, au secondaire l'industrie. Le tertiaire regroupe l'ensemble des autres activités, quel qu'en soit l'objet. Par la suite, les travaux de Jean Fourastié sur la productivité [6] le conduiront à définir le secteur tertiaire comme l'ensemble des activités marquées par un progrès technique faible voire nul. La proposition de Fourastié constitue une première tentative de définition positive du tertiaire, bien fragile cependant.

De nombreux auteurs ont depuis tenté d'établir une définition positive du secteur tertiaire. Mais faute de succès flagrant, l'INSEE continue à définir le secteur tertiaire « par complémentarité avec les activités agricoles et industrielles (secteur primaire et secondaire) »[7]. Il en exclut donc les activités agricoles et industrielles dont la production et la distribution d'eau et d'énergie, la construction. Il y inclut le commerce (de gros et de détail), les services de réparation, l'hébergement, la restauration, les transports et la communication, les activités financières, immobilières, de location, les activités de services aux entreprises, l'administration publique, l'enseignement, la santé et l'action sociale, ainsi que les services collectifs, sociaux et personnels. Assimilé à celui des services, le secteur tertiaire persiste donc à se dérober à une définition générale. On notera d'ailleurs que les nombreux débats agitant la communauté des chercheurs concernant l'articulation entre biens et services invitent à se poser la question de l'universalité et de la pertinence de la tripartition de l'économie.

En absence de solution idéale, nous reprenons la définition du « secteur tertiaire » de l'INSEE qui permet de rester cohérent avec les travaux existants. La définition imprécise du secteur tertiaire introduit des difficultés certaines pour les études énergétiques. La raison principale est liée au fait que la définition « par complémentarité » introduit une grande hétérogénéité des activités économiques.

La majorité des activités tertiaires se déroule au sein de bâtiments souvent conçus ou modifiés pour répondre à certains critères esthétiques et fonctionnels utiles à l'activité. Par exemple : les magasins sont souvent très vitrés pour satisfaire la demande de visibilité des clients. En conséquence, l'hétérogénéité des activités économiques du secteur tertiaire implique une grande diversité architecturale du parc, qui se traduit, en termes énergétiques, par différentes caractéristiques et performances thermiques. La description du parc de bâtiments se trouve encore complexifiée par l'existence des bâtiments multifonctionnels (galerie commerciale avec coiffeurs, boulangerie, cinémas, etc.) dans lesquels plusieurs activités cohabitent ; ceci s'étend au mélange tertiaire/résidentiel (cas des professions libérales en particulier).

Les particularités liées à l'activité donnent également forme aux profils d'usages énergétiques au sein d'un bâtiment. Concrètement, la consommation de chaque usage dépend de la manière dont les occupants sollicitent le(s) système(s). Par contre, le choix des systèmes n'est pas dépendant que de la nature de l'activité économique, mais aussi d'autres aspects comme les ressources disponibles (techniques et financières), la réglementation ou la pratique locale.

Les répartitions spatiales (mitoyenneté par exemple) et temporelles (constructions simultanées de type ZAC ou dispersées) sont aussi des paramètres importants à prendre en compte dans la description du parc. Car elles ont des impacts non négligeables sur les bâtiments et les systèmes :

- Implantation spatiale :
 - Les bâtiments abritant la même activité peuvent être conçus différemment selon le lieu où ils se trouvent. Un supermarché au centre-ville n'a pas la même architecture qu'un supermarché sur une zone commerciale en périphérie. L'environnement de construction limite aussi certains choix comme les systèmes, par exemple : la connexion aux réseaux de chaleur est souvent inaccessible en dehors du centre-ville.
 - Les conditions climatiques locales conditionnent le profil de la demande d'énergie.
- Répartition temporelle :
 - Les modes constructifs diffèrent d'une époque à une autre. Ils sont liés non seulement au style d'architecture répandu à chaque époque, mais aussi à la réglementation de la construction. En termes énergétiques, les marques de changement au fil du temps sont directement liées à l'évolution de la réglementation thermique.
 - L'évolution technologique introduit progressivement des systèmes de plus en plus efficaces pour un usage donné, et en même temps fait apparaître des nouveaux usages énergétiques. Etant donné que le rythme d'installation et de changement des systèmes dépend de beaucoup de facteurs (panne, dégradation, technologie dépassée, etc.) et parfois de nombreux acteurs, l'état des systèmes existants dans le parc est extrêmement disparate.

Pour résumer, l'hétérogénéité du secteur tertiaire résulte des activités économiques, des caractéristiques des bâtiments et des systèmes. Ces couplages sont complexifiés par la répartition spatiale et temporelle. Dans ce qui suit, nous cherchons dans la littérature quelles sont les méthodes de représentation d'une cible si complexe.

2. Les différentes méthodes de modélisation d'un parc de bâtiments

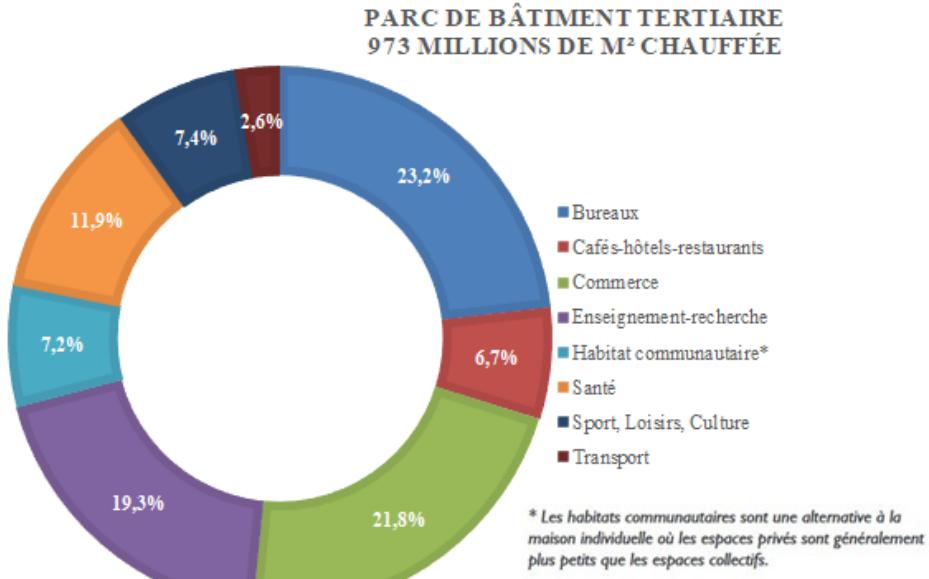
La littérature scientifique abonde d'articles traitant de bâtiments du secteur tertiaire, même si cette quantité est largement inférieure à celle du résidentiel. La plupart cependant traitent de cas particuliers (suivi d'opérations exemplaires, en neuf comme en rénovation, focus sur des usages ou segments de parc particuliers) et rares sont ceux qui abordent le parc de bâtiments lui-même, c'est-à-dire l'ensemble des bâtiments abritant des activités tertiaires à l'échelle d'un pays ou d'une région. De même, les statistiques ou études portant spécifiquement sur les bâtiments du secteur tertiaire sont rares.

La maille géographique considérée a une grande importance sur la façon dont est représenté le parc de bâtiments : plus vaste est le territoire couvert, plus grossières sont la description et la représentation du parc et plus l'évaluation de sa consommation d'énergie découle d'approches statistiques. On peut ainsi distinguer 3 modes principaux de représentation du parc tertiaire :

- Une représentation sous la forme de segments réputés homogènes, auxquels sont associés des surfaces. Ces segments sont principalement définis par la nature des activités exercées (activités de bureau, santé, ...), et affinés en tenant compte par exemple de l'énergie principale de chauffage. Cette représentation est la plus commune lorsque le territoire couvert est vaste (pays, région, voire département). Les consommations d'énergie sont alors calculées à partir de ratios donnés par unité de surface, déduits de méthodes statistiques. C'est l'approche privilégiée par le CEREN [8] (Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie).
- Une représentation sous forme d'archétypes de bâtiments. Cette représentation dérive de la précédente, mais ajoute à la prise en compte des types d'activités, certaines caractéristiques physiques du bâtiment. La possibilité d'une représentation explicite de la demande d'énergie est renforcée, au prix cependant d'une multiplication des segments dont la représentativité peut être difficile à établir. C'est l'approche privilégiée par le bureau d'études Energie Demain avec son modèle ENERTER [9].
- Une représentation sous la forme d'une population de bâtiments plus ou moins précisément caractérisés, et dont la consommation d'énergie peut être évaluée sur la base de ratios ou faire l'objet de simulations. Cette représentation est compatible avec l'utilisation de la méthode des archétypes. Cette représentation est la plus courante lorsque l'échelle territoriale est restreinte (du quartier à la commune)

En France, la source la plus pertinente à l'échelle nationale est le CEREN qui produit régulièrement des statistiques via les enquêtes annuelles (voir Figure 5). Les modèles énergétiques et prospectifs reposent très souvent sur le découpage du CEREN, sous forme de segments de surface chauffée. Cette méthode de représentation est adoptée par plusieurs organismes, notamment l'ADEME. Cela reflète le fait que le CEREN est considéré comme la référence principale des informations sur le parc tertiaire à l'échelle

nationale. La représentation privilégiée par le CEREN permet de donner une vision globale du parc. Une majeure partie des publications sur le parc tertiaire français est basée sur ses statistiques.



Source: Statistiques du CEREN - extraction 2016 (données 2013)

Echelle: France métropolitaine

Figure 5: Segmentation de la surface chauffée du parc de bâtiments tertiaire

Aux États-Unis, la représentation sous forme de segments de surface est aussi utilisée par le modèle NEMS (National Energy Modeling System) développé par le DOE (U.S. Department of Energy) au début des années 90s. NEMS est un modèle économétrique très complet portant sur la production, la demande et le marché énergétique. Il est pionnier dans la modélisation de la demande énergétique du parc de bâtiments et de son évolution prospective. Il couvre un spectre très large avec les modules spécifiques pour chaque sujet traité, l'organisation des modules est illustrée dans la Figure 6. Il existe plusieurs articles sur NEMS, sa structure globale est décrite dans [10]. La demande énergétique du parc de bâtiments fait partie de ce modèle et est divisée en deux modules distincts : résidentiel et tertiaire. Les documentations du module tertiaire et des autres modules de NEMS sont publiques et mises à jours régulièrement, elles sont disponibles dans [11] et [12].

Une grande partie des données d'entrée du module tertiaire de NEMS sont issues de l'enquête CBECS (The Commercial Buildings Energy Consumption Survey [13]), sa dernière version date de 2018. Le format de cette enquête partage certaines similarités avec celle du CEREN en France. Dans les deux cas, le parc tertiaire est décrit par des segments de surface, dont les caractéristiques sont relevées à partir des questions de chaque enquête. Dans les deux enquêtes, le parc de bâtiments tertiaire est donné en surfaces segmentées par zone géographique, tranche d'âge, tranche de surface et usage (ou bien secteur d'activité). Chaque segment est caractérisé énergétiquement à travers des consommations moyennes par unité de surface, par usage et par énergie. Grâce au découpage en zones géographiques, les caractéristiques énergétiques sont modulables selon des paramètres descriptifs de l'environnement local, par exemple, des conditions météorologiques comme l'irradiation solaire, la température de l'air, la température de l'eau. Dans le contexte des Etats-Unis, le prix de l'énergie est plus hétérogène qu'en France, en conséquence les prix moyens par type d'énergie font aussi partie des singularités des zones géographiques.

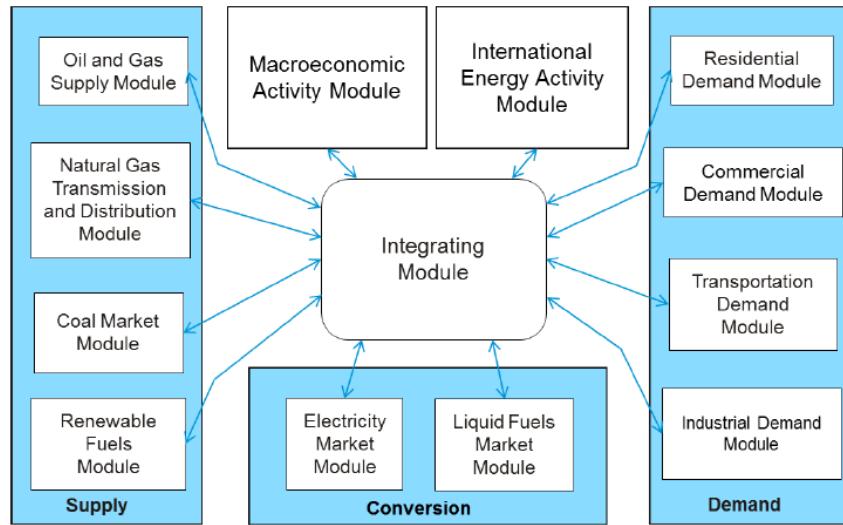


Figure 6: Organisation des modules de NEMS (source: [11] – P.18)

La différence la plus importante entre les deux enquêtes est le ciblage. L'enquête tertiaire du CEREN² recense des données énergétiques des établissements tertiaires, dont la surface chauffée et la consommation par usage énergétique sont traitées comme les caractéristiques appartenant d'abord aux établissements. C'est-à-dire que la notion de bâtiment apparaît indirectement via la surface chauffée. De l'autre côté, le questionnaire du CBECS cible des bâtiments tertiaires, dont la méthode d'échantillonnage est décrite dans [14].

La qualification et la classification d'un bâtiment tertiaire est donc établie en fonction des activités qui se déroulent à l'intérieur [15]. Lorsqu'un bâtiment alloue une certaine proportion de surface aux activités non-tertiaires, il est classé dans une catégorie résiduelle nommée « autres ». Via ce ciblage, le lien entre usage, système et bâtiment est mieux appréhendé par l'enquête CBECS. Et ceci permet à l'enquête CBECS d'évaluer la demande énergétique pour des portions de bâtiment ayant la même activité.

Dans le contexte français, l'enquête tertiaire du CEREN joue le même rôle que celle du CBECS, mais les informations sur les bâtiments y sont moins complètes. Cela est dû au fait que les répondants à cette enquête donnent des informations au niveau de l'établissement et de leur occupation, et non pas à l'échelle du bâtiment.

Cette différence de ciblage pourrait se justifier par le fait qu'il n'est pas toujours évident de qualifier un bâtiment de « tertiaire ». Des moyens importants ont été déployés par l'EIA (U.S. Energy Information Administration) pour repérer des bâtiments tertiaires, avant le lancement de l'enquête CBECS.

La représentation du parc sous forme de segments présente des limites importantes lors du traitement des sujets complexes, car le niveau de détail est insuffisant. Même avec un niveau de détail plus élevé, comme dans le cas du modèle NEMS, la description du parc via des segments ne permet pas d'exprimer pleinement l'état du parc réel. L'intérêt principal de cette représentation est de donner une visibilité du parc dans son ensemble. Comme il s'agit d'une observation à un niveau de détail très agrégé, l'hétérogénéité du parc tertiaire est omise. Or, seule la prise en compte de l'hétérogénéité peut décrire pleinement les déterminants de la demande d'énergie. Pour atteindre un tel objectif, il faut un très grand nombre de segments, ce qui réduirait drastiquement la lisibilité. Plus le niveau de détail augmente, plus l'on s'approche de l'échelle individuelle. De ce fait, la représentation du parc comme une collection de bâtiments individuels est plus adaptée pour des études approfondies.

² Le CEREN actualise chaque année ses études relatives au parc et à ses consommations

Il existe une approche qui permet d'augmenter le niveau de détail des segments. Elle introduit des caractéristiques physiques du bâtiment à travers des typologies [16]. Le modèle ENERTER développé par Energie Demain SARL [9] fait partie des modèles les plus aboutis en France. Ayant moins d'informations provenant directement des enquêtes que NEMS, la reconstitution des données du parc à partir de différentes sources est la partie la plus importante du modèle ENERTER. La particularité de ce modèle est sa représentation du parc sous forme d'archétypes. La méthode des archétypes consiste à concevoir des structures numériques de bâtiments représentatifs (par exemple : Bureaux de type Haussmannien), puis à trouver le poids statistique de chaque archétype dans la population totale de bâtiments.

Les caractéristiques du bâti sont issues des typologies et des paramètres locaux tels que la mitoyenneté et le facteur de forme ([9], P.108). Dans ENERTER, la distribution des archétypes est issue d'un processus de calibration qui appartient à Energie Demain SARL. Il est utilisé dans de diverses études sur des bâtiments tertiaires dans certains territoires français, notamment l'Île-de-France [17] et la région Centre [9]. La segmentation des surfaces tertiaires dans ENERTER est très proche ou presque identique à celle du CEREN.

ENERTER cherche aussi à décrire l'implantation géographique du parc à l'échelle communale, via des bases couvrant cette échelle. La première étape et aussi la plus importante consiste à estimer la surface occupée par le secteur tertiaire dans un périmètre géographique donné. Le principe consiste à déterminer les établissements par codes d'activité, et ensuite estimer leur surface via des indicateurs reliés aux statistiques de surface à grande échelle du CEREN. Ces indicateurs s'expriment souvent sous forme de ratios de surface par emploi. Le modèle ENERTER emploie plusieurs bases de données spécifiques pour reconstituer les surfaces des secteurs.

| Branche | Sources de données |
|-------------------------------|---|
| Bureau Administration | > Enquête « dénombrement des établissements 2008 » (DENETS) de l'Insee > Base SIRENE |
| Enseignement Recherche | > Base Permanente des Equipements 2008 de l'Insee (BPE) > DENETS |
| Habitat Communautaire | > DENETS > Fichier National des Etablissements Sanitaires et Sociaux (FINESS) |
| Santé Social | > DENETS > FINESS > Statistique Annuelle des Etablissements de santé (SAE) |

Tableau 1: Sources de données pour la reconstitution des surfaces d'ENERTER

Pour certains cas spécifiques, le modèle ENERTER fait appel à d'autres ratios afin d'estimer la surface, par exemple : surface par emploi, surface par lit pour l'hébergement et la santé, et surface par élève pour l'enseignement (voir Tableau 2).

En tout cas, cette méthode considère la surface comme caractéristique de l'activité économique d'un établissement. Le manque d'information au niveau de la construction est ensuite traité par la distribution statistique des archétypes. C'est-à-dire que des bâtiments tertiaires sont représentés par des types architecturaux avec des scénarios d'occupation et des systèmes liés à chaque archétype.

La méthode des archétypes permet d'augmenter considérablement le niveau de détail du modèle de parc. Néanmoins, la représentativité et la distribution des archétypes restent difficilement vérifiables. Pour prendre en compte l'hétérogénéité du parc, il faut une quantité très importante de types. Or, une telle augmentation induit une difficulté accrue pour maintenir la représentativité de l'ensemble des archétypes/segments.

| Branche | Niveau de désagrégation concernant le bâtiment | Niveau de désagrégation concernant l'activité | Informations complémentaires |
|------------------------|--|---|---|
| Bureau Administration | >Période de construction >Typologie bâti (6 existantes) >Usage de la climatisation >Energie de chauffage utilisée | >Activité exercée (selon la nomenclature d'activité française) >Type d'administration (état, commune, intercommune, région, département..) >Taille des établissements | Nombre d'établissements Nombre de salariés |
| Enseignement Recherche | >Période de construction >Typologie bâti (6 existantes) >Usage de la climatisation >Energie de chauffage utilisée | > Type d'enseignement ou activité (recherche en science humaine ou science physique, cantine primaire, cantine secondaire, internat, établissement secondaire, université, établissement préélémentaire, établissement élémentaire...) > Secteur privé ou public | Nombre d'établissements Nombre d'élèves Nombre de salariés |
| Habitat Communautaire | >Période de construction >Typologie bâti (3 existantes) >Usage de la climatisation >Energie de chauffage utilisée | > Activité exercée (selon la nomenclature d'activité française) | Nombre d'établissements Nombre de salariés Capacité en nombre de lits pour les maisons de retraites |
| Santé Social | >Période de construction >Typologie bâti (3 existantes) >Usage de la climatisation >Energie de chauffage utilisée | >Activité exercée (selon la nomenclature d'activité française) >Secteur privé ou public et nature de l'activité concernant l'activité hospitalière | Nombre d'établissements Nombre de salariés Nombre de lits et de places pour l'activité hospitalière |

Tableau 2: Niveaux de désagrégation de la description du parc – ENERTER

Le modèle ENERTER est un bon exemple de reconstitution de données en vue d'une simulation bottom-up de la demande énergétique.

Dans la littérature, une population de bâtiments peut aussi être modélisée grâce à l'usage du BIM (Building Information Modeling) qui consiste à bâtir un modèle numérique détaillé de chaque bâtiment réel à partir de ses données constructives. Le bâtiment réel constitue alors l'unité de base du modèle de parc. Cette approche essentiellement limitée aux immeubles récents peut produire des résultats très détaillés et réalistes, mais elle demande une grande quantité de données d'entrée qui doivent être de qualité. Selon la définition du NBIMS (National Building Information Modeling Standards committee of USA) cité dans [18], un modèle BIM d'un bâtiment nécessite des données depuis sa construction jusqu'à l'état actuel. L'approche BIM est de plus en plus appréciée et employée dans les projets de construction, elle est obligatoire pour les marchés publics.

Actuellement, il y a très peu de gestionnaires de bâtiments qui possèdent autant de données, en particulier dans les bâtiments anciens dont les documents initiaux n'ont pas été bien conservés et/ou les modifications ne sont pas documentées et archivées. L'implémentation du BIM pour les bâtiments existants demande un effort très important pour retrouver ou reconstituer les données. Dans l'article de Volk et al., 2014 [19], plusieurs méthodes d'établissement des modèles BIM pour des bâtiments existants sont discutées. Pour l'application à grande échelle, les méthodes les plus efficaces aujourd'hui consistent à reconstituer les données manquantes à partir de sources diverses (par exemple : BDTOPO, SIRENE, SITADEL et les données locales de l'énergie). Malgré les incertitudes à l'échelle individuelle, ces méthodes offrent une certaine pertinence d'un point de vue territorial.

Le manque de données « directes » sur les bâtiments est l'obstacle principal à la modélisation du parc à un niveau détaillé. On distingue données « directes » et « indirectes » selon la manière dont on obtient une information. Les données « directes » permettent d'accéder à l'information souhaitée sans passer

par des traitements intermédiaires. Or, il manque de données « directes » sur les caractéristiques des bâtiments du secteur tertiaire. Il faut donc employer les données « indirectes », qui nécessitent des hypothèses ou calculs intermédiaires afin d'obtenir ces informations. Beaucoup de sources de données « indirectes » existent mais il est très difficile de les réconcilier, car elles résultent de différentes méthodologies. Il faut donc une base centrale dans laquelle des hypothèses permettent de rassembler des sources « indirectes ». Idéalement cette base de données centralisatrice a une grande couverture géographique, dont l'échelle granulaire est celle du bâtiment.

Récemment, l'émergence des données SIG a fait évoluer la modélisation des quartiers, car le SIG peut être utilisé pour la consolidation des données. De nouvelles approches de modélisation des bâtiments à grande échelle avec un niveau de détail appréciable sont désormais envisageables. Le SIG est une source très riche d'informations sur la géométrie des bâtiments et l'environnement de construction. Il existe aussi plusieurs niveaux de détail des données SIG, de la géométrie en 2D jusqu'en 3D. Dans le cas le plus simple, les bâtiments sont décrits par une cartographie en 2D vue du ciel. Dans le meilleur des cas, le SIG possède des données géométriques en 3D de l'extérieur du bâtiment et de certains éléments intérieurs, par exemple : le nombre d'étages et la hauteur sous plafond. Dans tous les cas, le SIG apporte au moins des éléments sur la géométrie de l'enveloppe des bâtiments, ce qui permet ensuite un processus d'enrichissement de données avec d'autres sources ou certaines hypothèses. Plusieurs recherches sur la reconstitution du BIM à partir du SIG ont été conduites. L'article de Ma et Ren, 2017 [20] montre plusieurs applications issues de l'intégration du SIG dans le processus de modélisation BIM.

La capacité de cette méthode pour reconstituer un parc de bâtiments est démontrée par l'article de Steadman et al. 2020 [21]. Le parc de bâtiments du Grand Londres est établi via une méthode appelée 3DStock, avec un focus sur les bâtiments non résidentiels. Elle consiste à réconcilier plusieurs bases de données et enquêtes, notamment le croisement entre les données SIG et celles des établissements. A partir de ce lien, les données énergétiques sont ensuite distribuées aux bâtiments. Cette approche permet de mobiliser des données concernant en même temps des bâtiments et des établissements pour la caractérisation énergétique du parc. Cet article démontre que cette méthodologie peut prendre en compte l'hétérogénéité du parc, au moins sur la répartition spatiale des activités et des bâtiments. Elle permet aussi d'apporter les premiers éléments de réponse à un problème complexe que les méthodes des segments et des archétypes sont incapables de résoudre : comment détecter et décrire les bâtiments multifonctionnels. Cette méthode de représentation et de reconstitution est donc la méthode la plus proche de nos objectifs.

La méthode de représentation du parc sous forme de collection d'individus est employée par la plateforme SmartE [22] développée par le CES - Mines Paristech. SmartE est composé par deux parties principales :

- Création et enrichissement du parc à l'échelle du quartier
- Simulation dynamique avec le modèle thermique simplifié R6C2 (développé par la thèse de Berthou, 2013 [23])

Malgré le fait que le premier composant de SmartE est conçu principalement pour reconstituer le parc résidentiel, cette démarche très proche de ce que nous envisageons pour le parc tertiaire. Dans le parc reconstitué de SmartE, les caractéristiques physiques du bâtiment et des systèmes sont prises en compte pour la simulation dynamique, ainsi que l'emploi du temps des occupants. La simulation dans l'outil SmartE prend en compte les données météorologiques locales, telles que la température extérieure, la température d'eau et les flux solaires direct et diffus. Effectivement, cette prise en compte permet de décrire les impacts de la variation météorologique sur la demande énergétique. Non seulement les impacts bien connus comme la température extérieure et l'apport solaire sur le chauffage et la climatisation sont décrits, mais aussi l'intensité du flux solaire sur la demande d'éclairage, la

température d'eau sur la demande d'ECS. Par sa conception, SmartE permet de simuler un grand nombre de bâtiments, grâce au modèle R6C2.

De ce fait, cet outil est particulièrement adapté à notre approche, qui repose sur une prise en compte techno-explicite de l'hétérogénéité du parc de bâtiments. Cela permet de prendre en compte les caractéristiques des bâtiments, mais de manière simplifiée.

Dans la version de SmartE mise à disposition pour ce travail, chaque bâtiment est considéré comme une mono-zone sur le plan thermique. L'avantage de la simulation en mono-zone est la vitesse d'exécution. En revanche, le regroupement par mono-zone ne permet pas de prendre en compte les différentes zones thermiques qui n'ont pas les mêmes consignes de température, ainsi que les apports thermiques (charges internes et flux solaire).

En résumé, nous retenons la présentation des caractéristiques du bâtiment dans SmartE, et la simulation dynamique avec le modèle R6C2. Notons que SmartE est conçu d'abord pour le secteur résidentiel, en conséquence plusieurs composants de cet outil sont adaptés seulement aux ressources disponibles de ce secteur. De ce fait, nous adaptons les composants de l'outil SmartE, lors de ce travail, à la simulation de la demande d'énergie de bâtiments du parc tertiaire.

3. Synthèse de l'étude des modèles existants

Le secteur tertiaire est très hétérogène en activités économiques, en conséquence les caractéristiques des bâtiments tertiaires sont également très diverses. Cette hétérogénéité s'exprime non-seulement par l'architecture, mais aussi par l'occupation et les systèmes énergétiques.

Aujourd'hui, le parc de bâtiments tertiaire français est souvent représenté par les segments de surface chauffée, qui ne permettent pas d'exprimer l'hétérogénéité du parc. Cela est lié à la description incomplète du lien entre le modèle statistique et la physique des bâtiments. En conséquence, cette représentation limite des études approfondies du parc.

Cela nous mène à chercher dans la littérature les approches représentant une population de bâtiments de manière technico-explicite. Une simulation technico-explicite d'une population de bâtiments suppose que cette population soit représentée par une collection d'individus pleinement caractérisés. Dans le cas d'un parc de bâtiments, il existe deux approches principales permettant de reconstituer des individus : les archétypes et les modèles BIM. A l'échelle locale, la méthode des archétypes est difficilement déployable à cause du manque de connaissance sur la répartition statistique et la représentativité physique de chaque archétype. Avec l'émergence des données SIG et des grandes bases de données publiques, il est désormais possible de reconstituer certaines des caractéristiques de chaque bâtiment, même si la quantité et la qualité des données disponibles sont encore limitées. Cette approche prend en compte l'hétérogénéité du parc et les déterminants de la demande énergétique via le trio bâti-système-occupant. Elle permet également de définir un processus générique permettant de générer une population de bâtiments individuellement caractérisés pour chaque territoire, grâce à la couverture géographique des bases de données. Néanmoins, l'exactitude des caractéristiques reconstituées n'est pas assurée au niveau individuel avec cette approche, mais pourrait s'améliorer progressivement avec le développement et l'accessibilité croissante des bases de données.

Afin de faire le choix de la méthode de représentation du parc, nous comparons les points forts et les points faibles des méthodes existantes dans le tableau ci-dessous. Au regard des objectifs de cette thèse, la représentation du parc sous forme de collection de bâtiments individuellement caractérisés est la plus adaptée.

| Méthode de représentation d'un parc de bâtiments | Points forts | Points faibles |
|--|--|--|
| Segments de surface | <ul style="list-style-type: none">Simple à employerVision globale | <ul style="list-style-type: none">Niveau de détail faibleLacunes importantes pour traiter des sujets complexes |
| Archétypes (basés sur segments) | <ul style="list-style-type: none">Meilleure caractérisation physique que des segmentsDescription architecturale détaillée | <ul style="list-style-type: none">Difficile de garantir la représentativité des archétypesNombre trop élevé d'archétypes pour prendre en compte l'hétérogénéité |
| Collection de bâtiments caractérisés | <ul style="list-style-type: none">Niveau de détail élevéPrise en compte de l'hétérogénéitéReprésentation technico-explicite des déterminants de la demande d'énergie | <ul style="list-style-type: none">Gourmand en ressource (données)Plus difficile à déployer que les autres approches |

Tableau 3: Comparaison des méthodes de représentation d'un parc de bâtiments

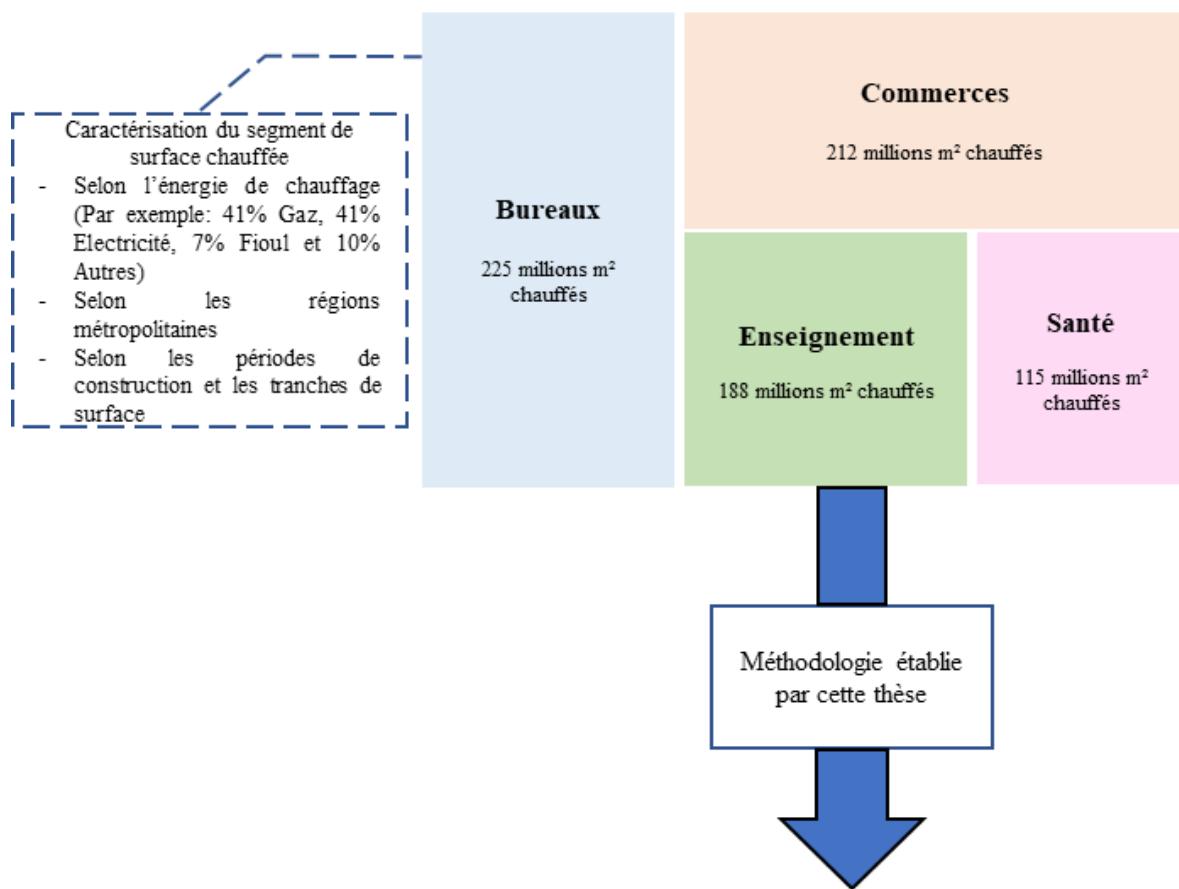
En France, cette représentation du parc tertiaire est encore très peu employée à grande échelle. Néanmoins, nous pouvons nous inspirer des modèles développés pour le secteur résidentiel, notamment

l'outil SmartE dans lequel le parc résidentiel est représenté par une collection de logements. Nous nous inspirons non seulement de la présentation des caractéristiques du bâtiment dans SmartE, et mais aussi de l'utilisation des modèles simplifiés dans la simulation dynamique.

Il y a une différence importante entre les ressources disponibles pour le résidentiel et le tertiaire. Afin de caractériser chaque individu comme dans SmartE, nous devons donc établir de nouvelles méthodes pour reconstituer le parc tertiaire, qui permettent de passer de la représentation du parc sous forme de segments, et au parc sous forme de collection de bâtiments pleinement caractérisés (voir illustration en Figure 7).

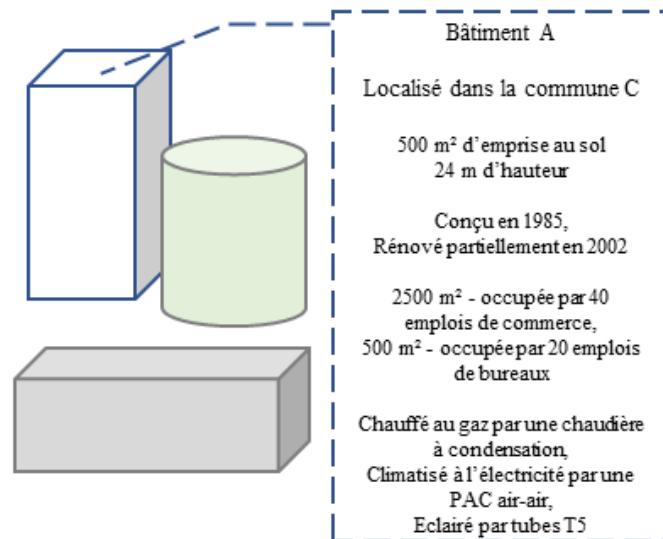
Parc tertiaire représenté sous forme de segments

Source: CEREN, échelle France Métropolitaine



Parc tertiaire représenté sous forme de collection de bâtiments

(exemple des bâtiments caractérisés individuellement*)



*La caractérisation à l'échelle individuelle vise à décrire l'hétérogénéité du parc. Elle n'a pas pour but de retrouver des informations exactes à l'échelle individuelle, car c'est au niveau collectif que la précision des résultats est souhaitée.

Figure 7: Illustration de l'objectif méthodologique de la thèse

III. Méthodologie - Reconstitution et enrichissement du parc

Dans cette partie, nous décrivons les différentes étapes de la méthodologie de reconstitution du parc sous forme d'une collection de bâtiments. Cette méthode repose sur la réconciliation de différentes bases de données pour caractériser individuellement chaque bâtiment. La reconstitution du parc (illustrée par la Figure 8) comporte les étapes suivantes :

Etape 1 : Collecte de données. Le choix des données est crucial et les critères de choix entre les différentes bases de données sont établis selon les objectifs visés. Cependant, il faut noter que les choix sont restreints par l'accessibilité des données (certaines sont confidentielles ou limitées à quelques adhérents).

Etape 2 : Identification des bâtiments qui abritent des activités économiques du secteur tertiaire. Cette étape a pour but de créer la structure du parc composé de bâtiments individuels qui doivent être décrits. Cette structure est formée par le croisement de données économiques, d'informations en provenance d'un SIG et des données issues des dépôts de permis de construire. Ce rapprochement permet de déterminer le type d'occupation de chaque bâtiment, et ensuite de poser des hypothèses sur ses caractéristiques. Nous nous concentrons particulièrement sur la caractérisation des surfaces, car c'est un paramètre essentiel sous plusieurs aspects, notamment la scénarisation de l'occupation connue au m² et donc la demande d'énergie.

Etape 3 : Caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments. A partir du SIG, certaines caractéristiques énergétiques peuvent être déduites de la géométrie des bâtiments, telles que la mitoyenneté, l'exposition au flux solaire et les ombrages. Plusieurs données et statistiques énergétiques ciblent des établissements du secteur tertiaire, notamment le taux de surface vitrée, la date de construction, la date et la nature des travaux de rénovation. Grâce aux liaisons établies précédemment entre les activités économiques au sens général et celles du bâtiment en particulier, ces données vont compléter la caractérisation thermique du bâtiment.

Etape 4 : Enrichissement des données des systèmes énergétiques. D'abord, nous identifions les usages les plus importants. Ensuite, nous déterminons la source d'énergie retenue pour chaque usage. Pour ce faire, il faut concevoir un modèle d'attribution basé sur les statistiques du marché au niveau sectoriel (bureaux, commerces, etc.), et décliné si possible à l'échelle géographique concernée. Chaque bâtiment se voit ainsi attribuer une source d'énergie pour chaque usage. Ceci permet de définir les systèmes (type, puissance et date d'installation) grâce à diverses enquêtes de terrain auxquelles nous avons eu accès.

Etape 5 : Caractérisation des profils d'occupation. Grâce aux résultats de l'étape 2, nous connaissons le nombre d'emplois classés par type d'activité au sein de chaque bâtiment, ce qui permet de simuler la présence des occupants, ainsi que la variation des consignes de différents usages énergétiques.

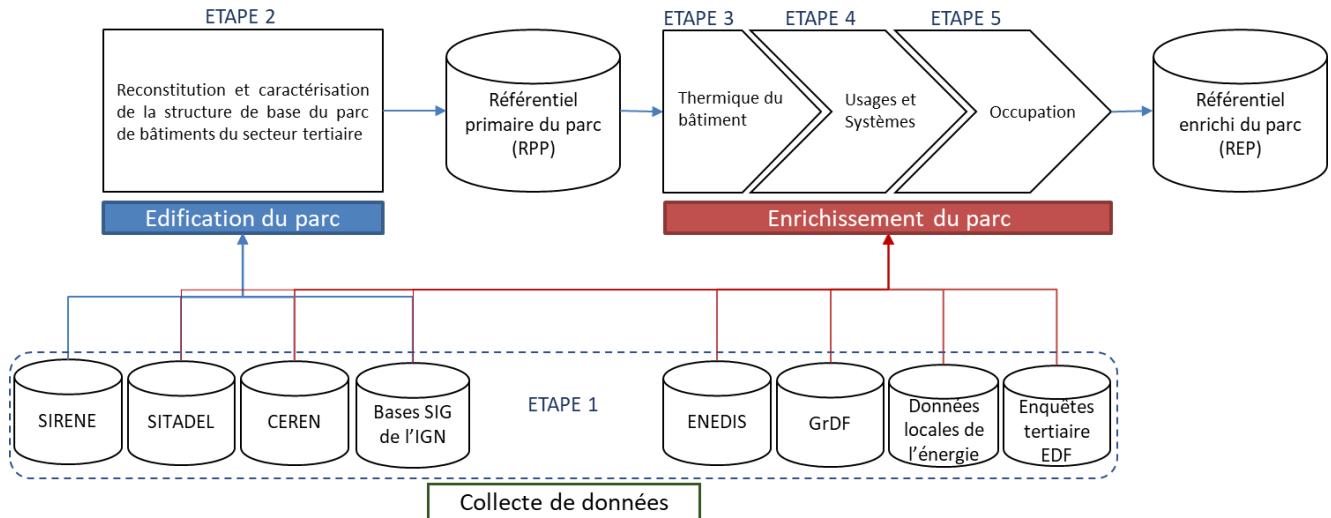


Figure 8: Les étapes de la reconstitution du parc

Le référentiel primaire du parc (RPP) est établi suite aux étapes 1 et 2. Il comporte les données reconstituées à l'échelle du bâtiment grâce au croisement entre données liées aux emplois et géométrie de la construction. Les résultats de l'étape 2 fournissent les surfaces par type d'activité au sein de chaque bâtiment. Il faut ensuite employer les valeurs statistiques issues des différentes bases de données pour enrichir les caractéristiques du parc dans les étapes 3,4 et 5.

1. Etape 1 : Collecte de données

A l'ère de l'open data, il existe une quantité importante de données disponibles de qualité variable et pour différents périmètres. Les informations que nous cherchons sur les bâtiments tertiaires sont noyées dans cet océan de données. Il est donc très important de sélectionner les bases de données les plus pertinentes au regard de nos objectifs.

D'abord, elles doivent contenir des informations sur les facteurs constituant l'hétérogénéité du parc. Nous distinguons trois facteurs principaux :

- Activités économiques des occupants et usage des surfaces
- Caractéristiques énergétiques du bâtiment et des systèmes
- Implantation spatiale et date de construction/rénovation

Deuxièmement, la méthodologie doit s'appliquer à tout territoire français métropolitain. La couverture géographique des bases de données retenues doit donc s'étendre à l'échelle nationale, et si possible avec une granularité à des échelles plus petites (régionale, départementale et communale).

Troisièmement, afin d'établir les liaisons entre les données, les bases doivent offrir une possibilité d'attribution spécifique. Par exemple : une base contenant des consommations d'énergie doit permettre d'identifier la contribution des différentes activités du secteur tertiaire.

Les bases de données suivantes correspondent aux critères cités précédemment : SIRENE [24], CEREN [8], SITADEL [25], BDTOPO [26], Opendata ENEDIS [27], Opendata GrDF [28], les données locales de l'énergie [29] et les enquêtes du secteur tertiaire d'EDF (confidentielles). Elles contiennent non seulement la matière la plus intéressante pour reconstituer l'image du parc de bâtiments existants, mais aussi les éléments historiques servant à envisager l'évolution du secteur. L'illustration en Figure 9 montre les couvertures thématiques (construction, énergie, économie) des différentes bases et leurs recouplements.

Ces bases de données ne sont pas construites spécifiquement pour la modélisation énergétique des bâtiments du secteur tertiaire, il faut donc déterminer ce que nous pouvons extraire de chaque base pour notre objectif.

Dans ce qui suit, après avoir introduit le contenu des bases de données utilisées, nous précisons les données sélectionnées dans chacune en vue de la reconstitution du parc de bâtiments du secteur tertiaire.

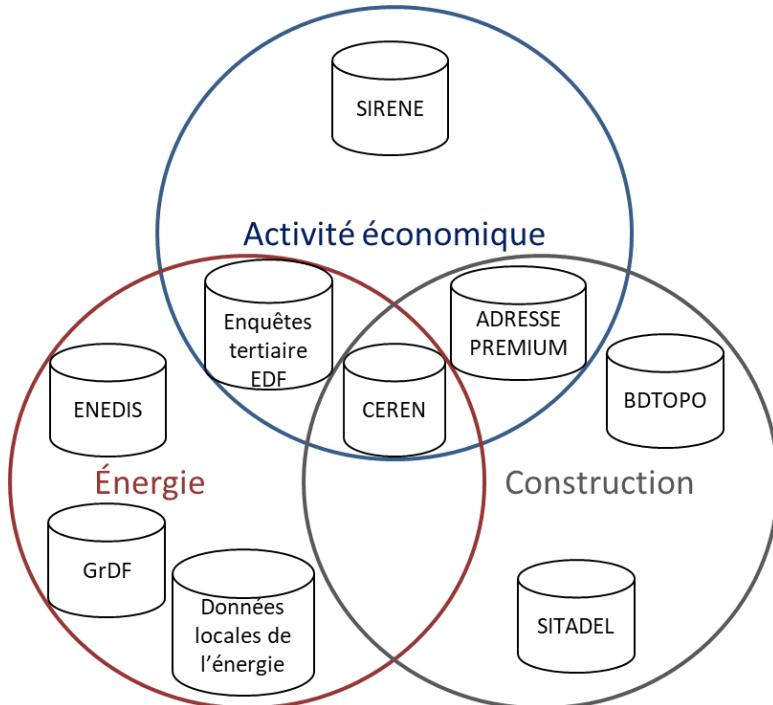


Figure 9: Positionnement des bases de données

La base de données SIRENE

La base de données du Système national d'Identification et du Répertoire des ENtreprises et de leurs Etablissements, couramment abrégé sous l'acronyme SIRENE, contient des informations détaillées de chaque entreprise et ses établissements. SIRENE est la base de référence pour mener la plupart des études et enquêtes statistiques des activités économiques à plusieurs échelles. Sa gestion est confiée à l'INSEE. Les entreprises et leur établissement sont référencés respectivement via les numéros SIREN et SIRET. Dans SIRENE, le **code APE** (Activité Principale Exercée) ou encore appelé NAF (Nomenclature d'Activités Française) est déclaré pour chaque établissement et pour chaque entreprise. Aujourd'hui, du point de vue économique, le code APE est la référence de la classification des activités économiques.

A partir de janvier 2017, la base SIRENE a été ouverte en accès libre gratuit. Il existe une version géocodée de SIRENE³ publiée sous licence gratuite d'Etablab [30]. Cette version est créée par C. Quest et relie les adresses des établissements répertoriés dans SIRENE à BANO (Base d'Adresses Nationale Ouverte) qui permet de géolocaliser ces derniers.

Dans ce travail, les données SIRENE géocodées sont incontournables, car elles permettent de décrire l'hétérogénéité en termes d'activités du secteur tertiaire. On retient les informations ci-dessous, qui peuvent être extraites de SIRENE :

³ La base SIRENE géocodée est mise en accès libre gratuitement par son auteur

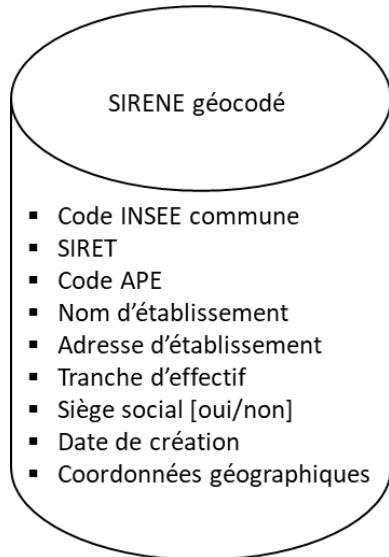


Figure 10: Données sélectionnées de la base SIRENE géocodé

Ces données doivent être utilisées avec prudence parce qu'elles sont déclaratives. Le nombre d'emplois est souvent utilisé pour estimer la surface ou pour créer des scénarios d'occupation. Or, il peut localement causer des erreurs pour deux raisons principales.

- D'abord, le nombre d'emplois précis n'est pas demandé aux établissements. Seule une tranche d'effectif est exigée dans la déclaration. Selon la taille de la tranche, l'écart entre ses deux bornes peut être très important, ce qui complique l'estimation du nombre d'emplois.
- Deuxièmement, l'effectif déclaré d'un établissement ne correspond pas forcément au nombre d'emplois présents sur place. Par exemple, un grand organisme possédant plusieurs sites peut déclarer un nombre important d'emplois à son siège afin de centraliser sa gestion du personnel, alors qu'une grande partie des employés travaillent sur d'autres sites. Malgré ces imprécisions, l'estimation de la surface à plus grande échelle reste pertinente. Dans le cas des organismes multisites, l'estimation de la surface totale de tous les sites n'est pas affectée par le fait qu'une partie des employés de chaque site est officiellement déclarée au siège, car le nombre total d'emplois lui est exact.

La base de données du CEREN

Le CEREN s'appuie sur le nombre d'emplois à l'échelle nationale pour évaluer la surface du parc tertiaire français. A partir de l'estimation des surfaces chauffées du CEREN et des statistiques d'emploi de l'INSEE, des **ratios de surface par emploi** sont calculables pour chaque « branche » (par exemple : Bureaux, Commerces, etc.) et « sous-branche » (par exemple : Bureaux privés, Bureaux de l'État, etc.). Notons que la classification des activités tertiaires par le CEREN fait apparaître 8 branches et 24 sous-branches. Dans ce qui suit, le terme "secteur" désignera un regroupement d'activités économiques dont la composition pourra varier selon le contexte. On pourra ainsi parler du "secteur tertiaire" ou du "secteur des bureaux". Le périmètre considéré sera précisé lorsqu'il sera nécessaire de lever une éventuelle ambiguïté. Les termes "branche" et "sous-branche" font quant à eux systématiquement référence à la nomenclature du CEREN (voir Annexes - Tableau 48: Correspondance entre codes APE, branches et sous-branches définies par le CEREN, page 171).

Les données du CEREN (surfaces chauffées, consommations par usage, etc.) issues des enquêtes permettent d'atteindre un niveau de précision appréciable à grande échelle. L'accès à la base de données du CEREN reste, pour l'instant, limitée à ses partenaires. L'extraction des données CEREN mise à disposition pour cette thèse fournit les informations précisées ci-dessous :

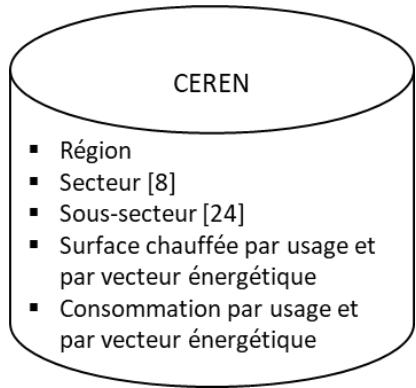


Figure 11: Données sélectionnées de la base CEREN

La base de données SITADEL

SITADEL est le « Système d'Information et de Traitement Automatisé des Données Élémentaires sur les Logements et les locaux ». Pour toutes les communes en France métropolitaine, les permis de construire à usage d'habitation (logement) et à usage non résidentiel (locaux) sont enregistrés dans la base SITADEL. Dans le dépôt d'un **permis de construire**, quand il s'agit d'un local tertiaire, la destination de construction doit être déclarée (dans le modèle CERFA n°13409*06 [31]). Les destinations et sous-destinations de constructions réglementées sont détaillées par l'arrêté du 10 novembre 2016 (source : [32]).

« L'arrêté définit les sous-destinations de constructions pouvant être réglementées par les plans locaux d'urbanisme en application des articles R. 151-27, R. 151-28 et R. 151-29 du code de l'urbanisme »

Cette base de données permet un **suivi historique de la construction neuve depuis 1975**. À partir de janvier 2018, les enregistrements mensuels (dépôt de la demande de permis, autorisation et début des travaux) de la base SITADEL sont ouverts en accès libre par le Service de la donnée et des études statistiques (SDES).

L'extraction de SITADEL disponible au moment de la réalisation des travaux contient les données annuelles de chaque commune, de 1975 à 2015. Les permis sont classés par 7 tranches de SHON - surface hors œuvre nette, réparties dans 11 catégories de construction. Dans chaque commune, pour chaque année, le nombre de permis et leurs surfaces sont sommés par tranche SHON et par catégorie de construction. Les données de SITADEL retenues dans ce travail sont structurées comme suit :

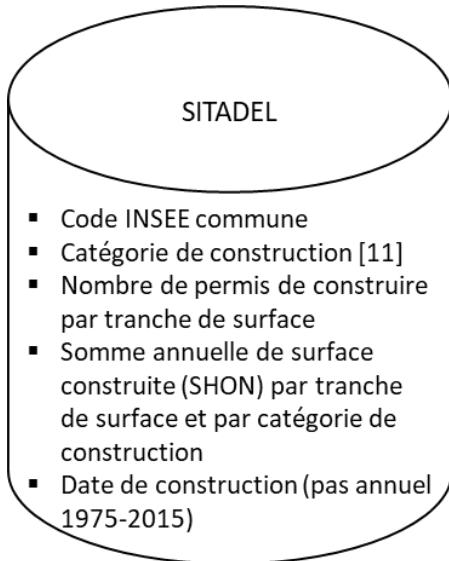


Figure 12: Données sélectionnées de la base SITADEL

Les bases de données SIG de l'IGN

La base de données BDTOPO est un produit de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) français. La BDTOPO est une base SIG de forme vectorielle. Elle couvre les territoires et décrit leurs infrastructures en France. Elle est gratuite pour les collectivités locales et les organismes de recherche publics, mais seulement concernant les travaux d'étude et de recherche. Pour toute exploitation commerciale, elle est sous licence payante. Via la BDTOPO, nous avons une description géométrique de chaque bâtiment en 2,5 D c'est-à-dire **l'emprise au sol et la hauteur**. L'emprise au sol de chaque bâtiment est représentée sous forme d'un polygone ou multi-polygone, formé par un ensemble de points. Chaque point possède ses coordonnées X – Longitude et Y – Latitude. Dans la version 2 de la BDTOPO, l'usage tertiaire des bâtiments est mentionné, mais les informations concernant l'usage restent très limitées. Un nombre important de bâtiments, dont l'usage est inconnu, est regroupé sous la classe « indifférencié ». Nous utilisons en complément un autre produit de l'IGN qui est la base Adresse Premium [33]. Elle décrit le lien entre les adresses et les bâtiments référencés dans la BDTOPO, grâce au cadastre et à d'autres données cartographiques de l'IGN. La description des deux bases se trouve ci-dessous.

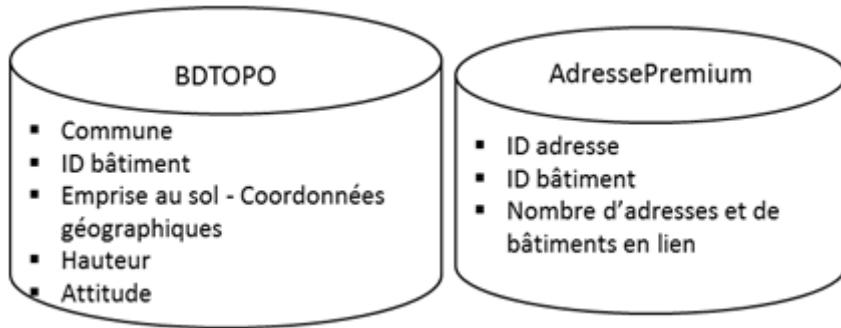


Figure 13: Données sélectionnées des bases SIG de l'IGN - BDTOPO et Adresse Premium

Les bases de données énergétiques en accès libre

Les bases de données en accès libre d'ENEDIS, de GrDF et les données locales de l'énergie donnent la **consommation énergétique à la maille communale**. Les bases utilisées dans notre travail sont du millésime 2017. Nous extrayons la consommation annuelle de l'**électricité** (ENEDIS), du **gaz** (GrDF)

et des **réseaux de chaleur et de froid** (données locales de l'énergie). Dans la base des données locales de l'énergie, il existe également des données de consommation de l'électricité et du gaz, mais la version 2017 de cette base a une qualité inférieure aux deux autres bases à la maille communale. Ces données permettent de connaître la contribution de trois grands secteurs : résidentiel, tertiaire et industriel par source d'énergie. On obtient ainsi une décomposition du marché énergétique à la maille communale. La séparation entre secteurs est basée sur les informations contenues dans les contrats : statut de l'acheteur et tranche de puissance. Or, l'acheteur figuré sur un contrat ne représente pas systématiquement tous les consommateurs couverts par ce contrat. Le critère de tranche de puissance laisse de côté les petits locaux tertiaires qui s'apparentent à du résidentiel. Ces bases de données en accès libre permettent la collecte des informations suivantes :

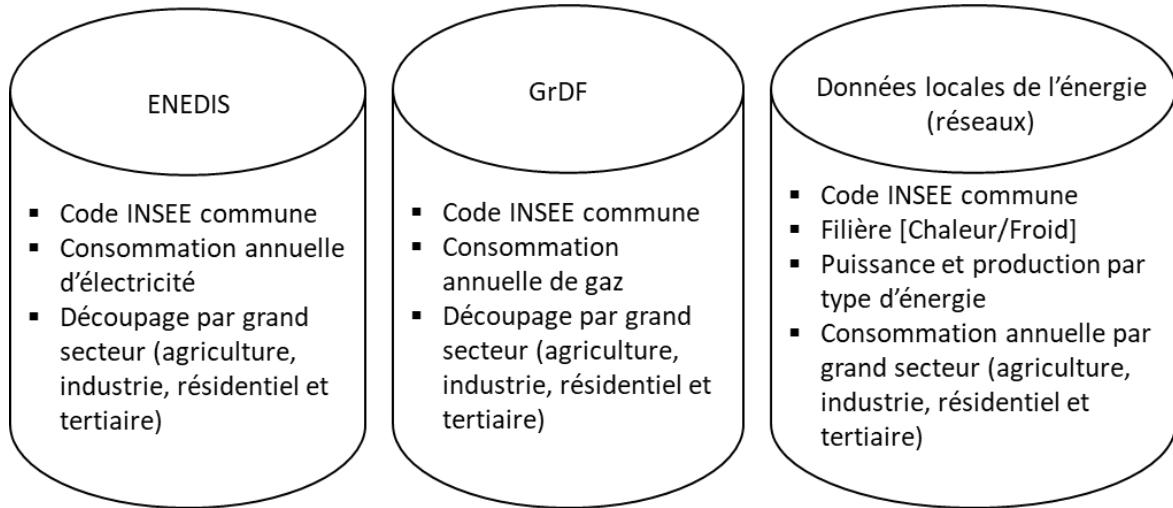


Figure 14: Données sélectionnées des bases en accès libre d'ENEDIS, de GrDF et des données locales de l'énergie

Les enquêtes du secteur tertiaire d'EDF

Entre 2008 et 2014, EDF R&D a conçu et financé plusieurs enquêtes auprès des établissements tertiaires de plusieurs types d'activités : bureaux, commerces, enseignement, hôtels, locaux culturels et équipements sportifs. Chaque enquête couvre un échantillon d'entre 500 et 1000 établissements de toute taille, qui sont implantés sur tout le territoire français. Ces enquêtes sont de nature confidentielle. La formulation des enquêtes évolue en fonction de la date, des personnes en charge et du secteur ciblé. En conséquence, les informations disponibles peuvent être très différentes d'une enquête à une autre.

Les enquêtes d'EDF représentent toutefois la seule source de données à notre disposition faisant le lien entre des bâtiments du secteur tertiaire et les systèmes installés ainsi que les travaux de rénovation. L'exploitation de ces enquêtes renseigne ainsi sur les systèmes installés et la nature des travaux de rénovation. Elles proposent aussi des éléments permettant d'enrichir certaines caractéristiques des bâtiments mal connues telles que le taux de vitrage et la forme de la toiture. Les données employées dans nos travaux sont décrites dans le Tableau 4.

| Secteur | Echantillon | Données extraites | | | |
|--------------|---------------------|--|---|--|---|
| | | Bâtiment | Système | Usage | Rénovation |
| Bureaux | 1239 établissements | Date de construction, tranche de surface, taux de vitrage | Source d'énergie, type de système, date d'installation, mode de régulation, consignes | Chauffage, climatisation | Date de rénovation la plus récente, nature des travaux |
| Commerce | 966 établissements | Date de construction, tranche de surface, surface de vente, surface d'entrepôt | | Eclairage | Date de rénovation la plus récente |
| Enseignement | 1806 établissements | Date de construction, tranche de surface, taux de vitrage, forme de toiture | | Chauffage, climatisation, ECS ⁴ , éclairage | Date de rénovation la plus récente, nature des travaux |
| Hôtellerie | 594 établissements | Date de construction, tranche de surface, taux de vitrage, forme de toiture | | Chauffage, climatisation, ECS, éclairage | Date de rénovation la plus récente, nombre de travaux, nature des travaux |
| Santé | 944 établissements | Date de construction, tranche de surface, forme de toiture | | Chauffage, climatisation, cuisson, ECS, éclairage | Date de rénovation la plus récente, nature des travaux |
| Musée | 154 établissements | Date de construction, tranche de surface | | _____ | Date de rénovation la plus récente, nature des travaux |

Tableau 4: Données extraites à partir des enquêtes d'EDF

Dans la suite, nous établissons un corps méthodologique permettant de croiser ces bases de données pour reconstituer un référentiel de bâtiments tertiaires.

⁴ ECS : Eau Chaude Sanitaire

2. Etape 2 : Identification des bâtiments et estimation de surface

Cette étape est composée de 4 parties principales :

- Identification des bâtiments et de leurs usages
- Evaluation de la surface
- Méthode de validation par sondage in situ
- Traitements spécifiques des configurations complexes

La première partie consiste à sélectionner, parmi les bâtiments référencés dans les données SIG, ceux qui sont les candidats les plus adéquats à abriter les établissements tertiaires. Les résultats de la première partie permettent de proposer deux méthodes pour évaluer la surface. Grâce à la confrontation de ces deux méthodes, nous pouvons analyser la pertinence de chaque méthode dans chaque configuration, ainsi que les configurations dans lesquelles, aucune méthode n'est satisfaisante. Ensuite nous effectuons un sondage in situ dans le but de valider/modifier les critères de choix entre méthodes. Nous consacrons la dernière partie aux traitements spécifiques des configurations complexes.

Après cette étape, les bâtiments identifiés se voient attribuer un nombre d'emplois par type d'activité économique. En fonction des attributs SIG et ceux d'emplois de chaque bâtiment, la surface est évaluée selon une méthode qui est le produit d'une combinaison en deux méthodes d'évaluation (la première selon les attributs SIG, la seconde selon les attributs d'emplois).

2.1. Identification des bâtiments abritant des activités tertiaires avec le SIG

La commune est la collectivité territoriale qui constitue l'échelon de base des divisions administratives du territoire français. C'est la raison pour laquelle, dans plusieurs bases de données, la commune est aussi l'échelle géographique de base. La commune est, de ce fait, l'échelle géographique de base de notre méthode de reconstitution. La commune de **Nanterre** est choisie en tant que première cible, justifié par une présence forte des activités tertiaires. La méthodologie sera aussi testée sur d'autres communes afin d'assurer son caractère généralisable.

La première étape consiste à identifier les bâtiments qui abritent des établissements du secteur tertiaire, et ensuite à caractériser les activités des occupants au sein de chaque bâtiment via le nombre d'emplois per type d'activité. Grâce aux données SIG il s'agit de trouver une solution à la question « qui est où ? ». Cette étape se déroule en 3 temps (illustration en Figure 15) :

- Premièrement : identifier les bâtiments référencés dans le SIG qui sont susceptibles d'abriter les établissements du secteur tertiaire.
- Deuxièmement : évaluer la surface de chaque bâtiment. La fusion des données SIG avec celles liées aux emplois ouvre la possibilité d'employer plusieurs méthodes d'estimation de surface, voire les combiner pour résoudre les cas spécifiques.
- Troisièmement : attribuer la catégorie de construction (classification des permis de construire de la base SITADEL) selon le type d'activité qui occupe le plus de surface au sein du bâtiment. Notons que l'attribution de la catégorie de construction nous permet d'employer la base SITADEL, afin d'obtenir la distribution des surfaces par date de construction. La confrontation entre les estimations de surface et l'historique des permis de construction entre 1975 et 2015 permet d'évaluer la part construite avant 1975. Deux conditions sont nécessaires pour réaliser cette confrontation. La première est la réconciliation des deux systèmes de classification des surfaces, qui se traduit par les hypothèses sur la correspondance entre les codes APE et les catégories de construction. La deuxième est la clarification des notions de surface (par exemple

: SHON et surface chauffée). En effet, les différentes notions de surface peuvent introduire de la confusion lors des comparaisons. Une méthode d’attribution de la date de construction aux bâtiments est établie grâce à l’utilisation de la base SITADEL et l’estimation des surfaces construites avant 1975. Dans ce chapitre, elle se figure dans la partie 3.1 Distribution de la date de construction.

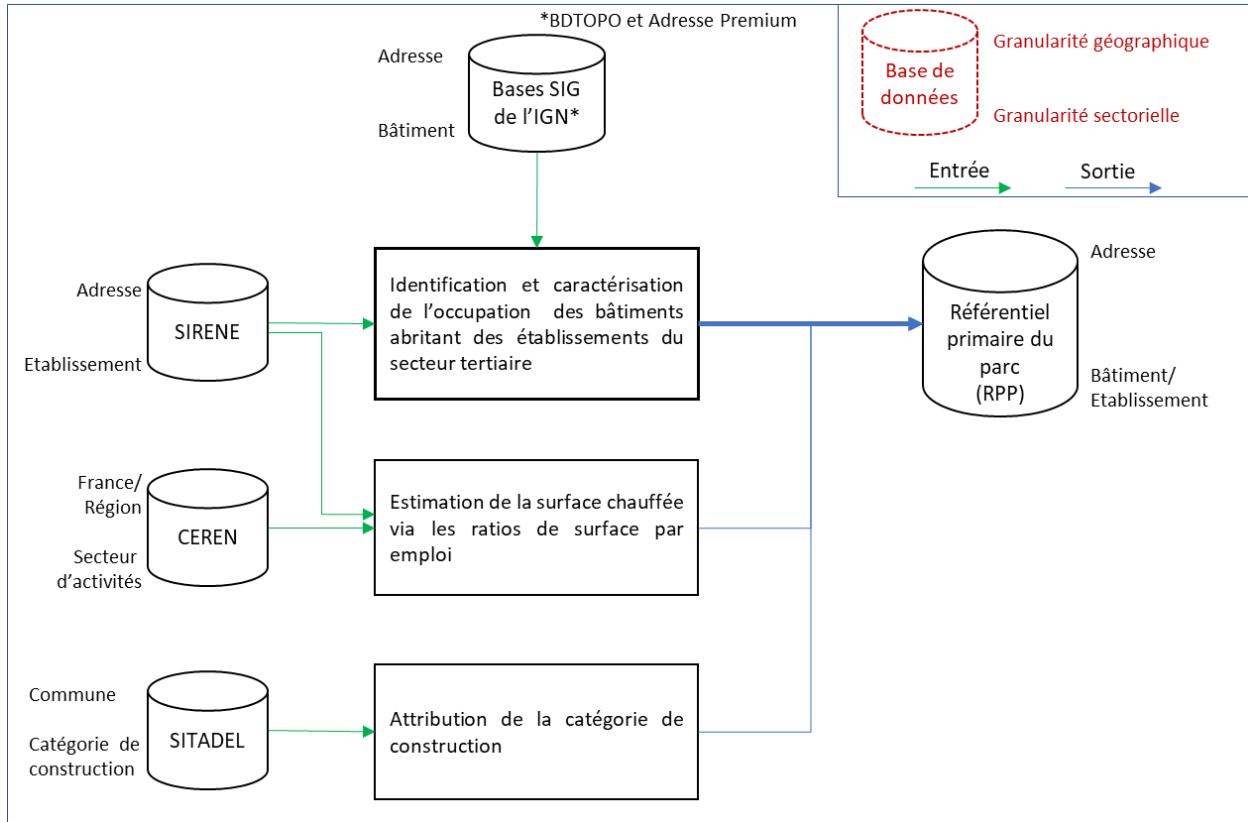


Figure 15: Les étapes de croisement des bases de données pour établir le référentiel primaire du parc (RPP)

Pour une commune donnée, nous obtenons la liste d’établissements du secteur tertiaire via une extraction selon le code APE (voir Tableau 48 en Annexes) à partir de la base SIRENE géocodée. Grâce aux coordonnées géographiques de l’adresse de chaque établissement, nous pouvons retrouver le(s) bâtiment(s) par cette adresse. Les emplois classés par le code APE des établissements localisés sont ensuite alloués aux bâtiments, donnant une première estimation de l’occupation.

Avant d’aborder la distribution des emplois aux bâtiments, plusieurs pré-traitements sont nécessaires. D’abord, rappelons que seule une tranche d’effectif est déclarée, donc que le nombre d’emplois précis est inconnu. Afin d’estimer le nombre d’emplois, nous adoptons la méthode de Marty-Jourjon et al., 2018 [34] (voir Tableau 5). Ensuite, en utilisant les ratios de surface par emploi du CEREN, on estime la surface chauffée de chaque établissement.

| Tranche d'effectif | Effectif retenu |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1 à 2 salariés | 1,5 |
| 3 à 5 salariés | 4 |
| 6 à 9 salariés | 7,5 |
| 10 à 19 salariés | 14,5 |
| 20 à 49 salariés | 34,5 |
| 50 à 99 salariés | 74,5 |
| 100 à 199 salariés | 149,5 |
| 200 à 299 salariés | 249,5 |
| Au de-là | Effectif à la centaine près |

Tableau 5: Effectifs retenus des tranches d'effectifs proposés dans la base de données SIRENE (source : [34])

Chaque établissement a l'obligation de déclarer son adresse à l'INSEE, qui stocke ensuite ces données dans la base SIRENE. Dans la version géocodée, chaque adresse est reliée à un identifiant et une coordonnée (Longitude - X, Latitude - Y) issus de la base BANO (Base d'Adresses Nationale Ouverte) [35]. Ce système d'identification des adresses est aussi utilisé dans la base Adresse Premium de l'IGN. Une partie des identifiants des adresses des établissements est couverte par Adresse Premium, mais le taux de couverture varie d'une commune à une autre. Dans le Tableau 6, nous remarquons quelques cas où il n'y a pas de corrélation entre le taux de couverture, la taille et la densité de la commune, ce qui montre que la qualité de données de la base Adresse Premium est très hétérogène.

| Commune | Code INSEE commune | Nombre d'établissements du secteur tertiaire | Pourcentage couvert par Adresse Premium |
|--------------------|-------------------------------|---|--|
| Paris 1 | 75101 | 5875 | 92% |
| Paris 6 | 75106 | 5769 | 94% |
| Paris 13 | 75113 | 7105 | 84% |
| Courbevoie | 92026 | 2915 | 69% |
| Nanterre | 92050 | 2599 | 72% |
| Puteaux | 92062 | 2337 | 59% |
| Evry | 91228 | 1644 | 40% |
| Massy | 91377 | 1170 | 57% |
| Yerres | 91691 | 497 | 73% |
| Orléans | 45234 | 4006 | 75% |
| Fleury-les-Aubrais | 45147 | 496 | 67% |
| Montargis | 45208 | 712 | 79% |

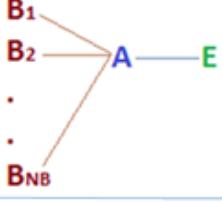
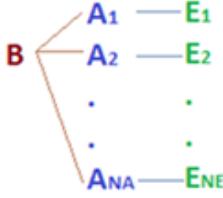
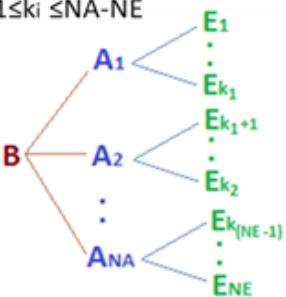
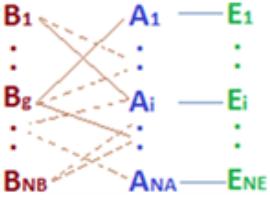
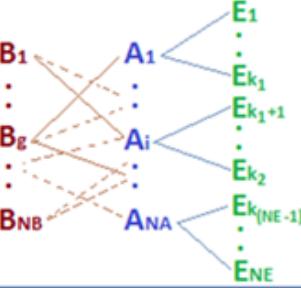
Tableau 6: Couverture d'Adresse Premium des adresses dans la base SIRENE

Via l'intermédiaire d'Adresse Premium, une partie des établissements (SIRENE) est mise en lien avec les bâtiments du SIG (BDTOPO) via les adresses. Néanmoins, la partie non couverte doit aussi être prise en compte. Un traitement particulier est donc réservé aux établissements dont les adresses n'ont pas de lien avec des bâtiments. La géolocalisation de chaque adresse se présente comme un point (X,Y). On cherche le bâtiment dont la distance entre son barycentre et le point adresse est la plus petite.

Même si les liens adresse-bâtiment et établissement-adresse sont établis, ce n'est pas toujours évident d'allouer un établissement à un bâtiment. Plusieurs biais peuvent fausser l'allocation. **Un bâtiment peut avoir plusieurs adresses et une adresse peut correspondre à plusieurs bâtiments** (cas d'un campus universitaire). Les emplois d'un établissement peuvent se trouver dans un bâtiment, ou bien se répartir dans plusieurs. A défaut de solution parfaite, une méthode de distribution des emplois aux bâtiments est

proposée, sans pour autant allouer tel établissement à tel bâtiment. Elle consiste à recenser toutes les configurations possibles et ensuite à établir des règles d'allocation au cas par cas. Afin d'analyser chaque relation adresse-bâtiment-établissement, on utilise trois indicateurs : nombre de bâtiments, nombre d'adresses et nombre d'établissements par adresse. Huit configurations ont été déterminées (illustration en Figure 16) :

- 1) Un seul établissement localisé à une adresse qui correspond à un seul bâtiment.
- 2) Un seul établissement localisé à une adresse qui correspond à plusieurs bâtiments.
- 3) Plusieurs établissements localisés à une adresse qui correspond à un seul bâtiment.
- 4) Plusieurs adresses correspondent à un seul bâtiment, avec un seul établissement est localisé à chaque adresse.
- 5) Plusieurs adresses correspondent à un seul bâtiment, avec plusieurs établissements localisés à chaque adresse.
- 6) Plusieurs établissements localisés à une seule adresse qui correspondent à plusieurs bâtiments.
- 7) Plusieurs adresses correspondent à plusieurs bâtiments (avec des interconnexions), avec un seul établissement est localisé à chaque adresse.
- 8) Plusieurs adresses correspondent à plusieurs bâtiments (avec des interconnexions), plusieurs établissements localisés à chaque adresse.

| | |
|---|--|
| <p>1. $NA=NB=NE=1$ $na=nb=ne=1$</p>  | <p>2. $NB>1, NA=NE=1$ $na=1 \ (i \in [1,NB]), nb>1, ne=1$</p>  |
| <p>3. $NA=NB=1, NE>1$ $na=nb=1, ne>1$</p>  | <p>4. $NB=1, NA=NE>1$ $na>1, nb=1 \ (i \in [1,NA]), ne=1$</p>  |
| <p>5. $NB=1, NA>NE>1$ $na>1, nb=1 \ (i \in [1,NA]), ne\geq 1$ $1 \leq ki \leq NA-NE$</p>  | <p>6. $NA=1, NB>1, NE>1$ $na=1 \ (i \in [1,NB]), nb>1, ne>1$</p>  |
| <p>7. $NB>1, NA=NE>1$ $nag>1 \ (g \in [1;NB]), nb\geq 1 \ (i \in [1;NA]), ne=1$</p>  | <p>8. $NB>1, NE>NA>1$ $nag>1 \ (g \in [1;NB]), nb\geq 1 \ (i \in [1;NA]), ne\geq 1$ $1 \leq ki \leq NA-NE$</p>  |

B: Bâtiment

A: Adresse

E: Etablissement

Figure 16: Relations Adresse-Bâtiment-Etablissement : configurations envisagées

| Dans une relation | Pour une adresse | Pour un bâtiment |
|---|---|------------------------------------|
| NB = nombre de bâtiments dans la relation | nb = nombre de bâtiments de l'adresse | na = nombre d'adresses du bâtiment |
| NA = nombre d'adresses dans la relation | ne = nombre d'établissements de l'adresse | |
| NE = nombre d'établissement dans la relation | | |
| NE≥NA≥1 ; NB ≥1 | | |

La décomposition des relations adresse-bâtiment-établissement, nous permet de proposer trois méthodes de distribution des emplois :

- La première consiste à traiter les cas les plus faciles où il n'y a qu'un seul bâtiment concerné : configurations 1, 3, 4 et 5. Il s'agit de regrouper les emplois des établissements et les affecter au bâtiment concerné.
- La deuxième consiste à distribuer les emplois d'un seul établissement aux bâtiments correspondant à son adresse (configuration 2), proportionnellement à leur surface⁵. Cette méthode présente une exception pour traiter les "petits" établissements regroupant leurs emplois dans un seul local. Ainsi, si le nombre d'emplois d'un établissement est inférieur à un certain seuil, on affecte ses emplois au bâtiment dont la surface est la plus proche de celle estimée⁶ via le ratio surface par emploi. Actuellement, on fixe ce seuil d'effectif à 50 emplois.
- La troisième méthode est réservée aux configurations 6, 7 et 8. Elle agrège les données des établissements à la maille adresse, et distribue ensuite proportionnellement les emplois selon la surface des bâtiments associés. La règle définie pour la deuxième méthode s'applique si le nombre d'emplois d'un regroupement est inférieur au seuil d'effectif cité ci-dessus. Cette troisième méthode est donc très proche de la deuxième, la différence principale est l'agrégation des données à l'adresse.

Ces méthodes de distribution nous permettent d'affecter le nombre d'emplois par code APE à la maille du bâtiment. Grâce à cette affectation, nous pouvons estimer la surface occupée par chaque secteur d'activité au sein d'un bâtiment. Dans la partie suivante, nous décrivons notre méthode d'estimation des surfaces à partir des données reconstituées.

⁵ La surface utile (SU) du bâtiment est la notion employée dans cette méthode

⁶ La surface estimée est la surface chauffée de l'établissement

2.2. Méthodes d'estimation des surfaces

Dans la modélisation d'un parc de bâtiments, la surface est à l'évidence une caractéristique de premier ordre. Plusieurs hypothèses et calculs en dépendent, par exemple : la simulation de la demande énergétique est conditionnée par la surface. Dans l'article de Frayssinet et al., 2018 [36], la comparaison et l'analyse de deux outils de simulation de quartiers montre que l'écart le plus important provient de la différence sur la surface estimée. De ce fait, nous apportons une attention particulière à la méthode d'estimation de surface.

Puisque la surface est une grandeur clé, il est impératif d'en donner une définition précise et de lever toute ambiguïté à son sujet, et ce d'autant plus que cohabitent de multiples définitions de la notion de « surface » dans le domaine du bâtiment.

Les définitions de surface

On commence par la définition des surfaces règlementaires (voir Tableau 7) : SHON (surface hors œuvre nette), SHOB (surface hors œuvre brute), SDO⁷ (surface dans œuvre), SP (surface de plancher), SU (surface utile), SH ou SHAB (surface habitable), etc.

| | Compris dans le calcul de la surface | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | depuis le 1er mars 2012 | | avant le 1er mars 2012 |
| | SU | SDO | SDP | SHON | SHOB |
| | Surface Utile | Surface Dans Œuvre | Surface de Plancher | Surface Hors Œuvre Nette | Surface Hors Œuvre Brute |
| Murs extérieurs | | | | | |
| Isolation extérieure | | | | | |
| Isolation intérieure | | | | | |
| Murs intérieurs porteurs | | | | | |
| Cloisons fixes | | | | | |
| Cloisons mobiles | | | | | |
| Toitures terrasses, aménageables ou non | | | | | |
| Balcons, loggias... | | | | | |
| Coursives et galeries fermées permettant l'accès à des locaux | | | | | |
| Vérandas | | | | | |
| Combles ou sous-sols aménageables y compris les autres réserves foncières | | | | | |
| Combles ou sous-sols non aménageables HSP < 1m80 | | | | | |
| Sous-sols y compris les parkings (**) | | (**) | | | |
| Niveaux intermédiaires (mezzanines, galeries, paliers des escaliers fermés) | | | | | |
| Circulations verticales fermées (uniquement les niveaux servant d'emprise et les paliers) | | | | | |
| Locaux techniques en combles, sous-sols, terrasses fermées | | | | | |
| Locaux techniques en étage courant y compris les gaines techniques et gaines d'ascenseur | | | | | |
| Circulations horizontales | | | | | |
| Espaces d'attentes intégrés aux circulations | | | | | |
| Sanitaires | | | | | |
| Hall d'entrée et sas d'accès (hall, ambulances...) | | | | | |
| Archives | | | | | |
| Bureaux, salles de réunion, cafétéria... | | | | | |

(**) : Les parkings en infrastructure sont traditionnellement exclus de la SDO lorsqu'il s'agit de caractériser l'architecture et la géométrie d'un bâtiment au travers du ratio SDO/SU. Il peut être pertinent de les intégrer dans l'assiette de la SDO pour le calcul du ratio coût de construction / m²SDO.

Tableau 7: Différence entre les différentes surfaces règlementaires (Source : ANAP [37])

⁷ La SDO est définie par l'ANAP. Elle n'est pas une surface règlementaire.

La base SITADEL emploie la SHON alors que le CEREN emploie la "surface chauffée" qui n'est pas une surface réglementaire. Cette "surface chauffée" est déduite des questionnaires adressés aux établissements, la pertinence des réponses dépend donc fortement de la perception de la "surface chauffée" par la personne correspondante. En absence d'indication précise, nous assimilons la "surface chauffée" à la surface utile (SU).

Les méthodes d'estimation de la surface

La distribution des emplois aux différents bâtiments permet d'employer deux méthodes pour estimer la surface utile :

1 - A partir des ratios :

$$\text{Surface utile (SU)} = \text{Ratio surface par emploi (CEREN)} \times \text{Nombre d'emplois (SIRENE)}$$

2 - A partir de la géométrie du bâtiment :

$$\text{Nombre d'étages} = \text{Partie entière} \left[\frac{\text{Hauteur (BDTOPO)}}{\text{Hauteur d'étage (Hypothèse)}} \right]$$

$$\text{SHOB} = \text{Emprise au sol (BDTOPO)} \times \text{Nombre d'étages}$$

Dans la BDTOPO version 2, la seule surface donnée est l'emprise au sol. A partir de cette surface, certaines hypothèses sont nécessaires afin d'obtenir les autres surfaces réglementaires. On s'intéresse aux surfaces suivantes : SHOB, SHON et SU. La SHOB peut être calculée à partir de l'emprise au sol et la hauteur du bâtiment, en posant les hypothèses suivantes :

- Les murs extérieurs sont verticaux
- La hauteur du bâtiment inclut le toit
- Les deux hypothèses précédentes permettent de calculer le nombre d'étages qui vaut la partie entière de la hauteur du bâtiment divisé par la hauteur sous plafond
- SHOB = Emprise au sol x Nombre d'étages
- SHON = 0,85 x SHOB (Selon [38], le ratio de SHON sur SHOB est compris entre 0,6 et 0,95)
- SU = COEF x SHON, avec COEF : ratio SHON/SU par catégorie de construction (voir Tableau 9). Les valeurs de ce tableau sont établies à partir de fiches d'architectes (voir Annexes - Tableau 50: Sources des données des ratios Surface Utile sur SHON, page 183). Typiquement ce tableau pourra être affiné par la suite sans changer la méthode.

| Catégorie de construction | Ratio SU/SHON |
|---------------------------|---------------|
| Artisanat | 0,85 |
| Bureaux | 0,85 |
| Commerces | 0,85 |
| Enseignement | 0,85 |
| Entrepôt | 0,6 |
| Hébergement | 0,85 |
| Loisirs et culture | 0,6 |
| Santé | 0,85 |
| Social | 0,85 |
| Spécial | 0,6 |
| Transport | 0,85 |

Tableau 8: Ratios SHON/SU par catégorie de construction

L'attribution de la catégorie de construction au bâtiment est basée sur l'hypothèse, que l'architecture du bâtiment est déterminée par son usage principal, soit l'activité dominante en termes d'occupation. Grâce

à l'estimation de la surface chauffée via le nombre d'emplois distribué, nous déterminons donc le code APE majoritaire dans chaque bâtiment et attribuons ainsi une catégorie de construction au bâtiment via un tableau de correspondance (voir Annexes - Tableau 49: Correspondance entre codes APE et catégories de construction, page 180) créé à dire d'expert (là encore, ce tableau pourra être affiné par la suite sans changer la méthode).

Dans une première mise en œuvre de notre méthode, nous posons l'hypothèse que la hauteur sous plafond de toute catégorie de construction est égale à 3 m. Comme au sein de chaque bâtiment, un nombre d'emplois est distribué par sous-secteur, on en déduit la surface occupée par l'activité tertiaire au sein d'un bâtiment. La comparaison entre l'estimation de surface via les emplois et à partir des données SIG permet en outre de caractériser une **occupation mixte** dans les bâtiments (par exemple : bâtiments multifonctionnels dont mixtes tertiaire-résidentiel). La comparaison des deux estimations de surface est maintenant confrontée à une observation de bâtiments réels.

Comparaison des méthodes d'estimation

Afin de trouver la meilleure méthode d'évaluation, une comparaison est réalisée avec les données de SITADEL comme "juge de paix". Comme les deux méthodes d'estimation ont chacune leurs avantages et leurs faiblesses, on cherche à savoir dans quels cas, telle méthode serait plus pertinente. Nous regardons d'abord les résultats à l'échelle communale. Rappelons que les données historiques annuelles dans SITADEL couvrent seulement la période de 1975 à 2015. La part de constructions d'avant 1975 n'y figure pas. En conséquence, la somme des surfaces du tertiaire dans SITADEL sera a priori inférieure à celle évaluée par les deux méthodes. On peut comparer la distribution de surface par catégorie de construction et celle par tranche de surface. Ces deux comparaisons nécessitent une uniformisation des résultats. Toutes les surfaces sont d'abord converties en SHON ; les catégories de construction issues de SITADEL servent de référence. *La comparaison par tranche de surface est donnée à titre indicatif car elle correspond à une classification de bâtiments, alors que la méthode de la surface par emploi ignore la notion de bâtiment (la surface évaluée pourrait être la part occupée par des emplois tertiaires dans un bâtiment, ou plusieurs bâtiments de surface différente).*

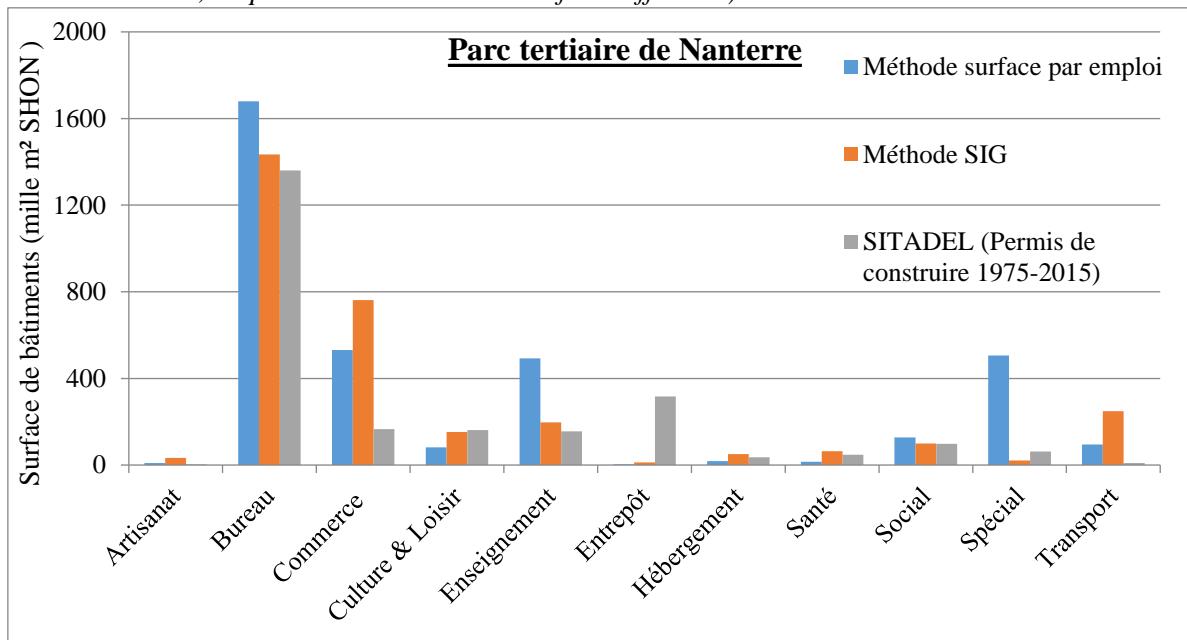


Figure 17: Comparaison des résultats des méthodes d'estimation de surface par catégorie de construction sur la commune de Nanterre

Cette comparaison est réalisée sur la commune de Nanterre dont le parc est relativement jeune. Le nombre et la surface des bâtiments à usage tertiaire (surtout les bureaux) à Nanterre ont connu une

croissance remarquable depuis la construction du quartier de la Défense dans les années 60. Ce fait pourrait être à l'origine de la bonne correspondance entre les estimations et la base SITADEL, pourtant elle n'inclut pas les bâtiments construits avant 1975.

La comparaison en surface par catégorie de construction (Figure 17) montre une distribution relativement similaire entre les trois sources, sauf pour quelques secteurs spécifiques. On observe que la surface de la catégorie "Entrepôt" est très élevée dans SITADEL par rapport aux deux autres évaluations, et que c'est l'inverse pour la catégorie "Commerces". La différence tient au fait que le lien entre le secteur d'activité et la catégorie de construction n'est pas toujours simple. Par exemple, un établissement du secteur "Commerces" peut posséder des bâtiments de commerce, des bureaux et des entrepôts. **Cette observation montre la nécessité d'établir des règles permettant de distinguer la surface de vente et la surface d'entrepôt d'un établissement de commerce.**

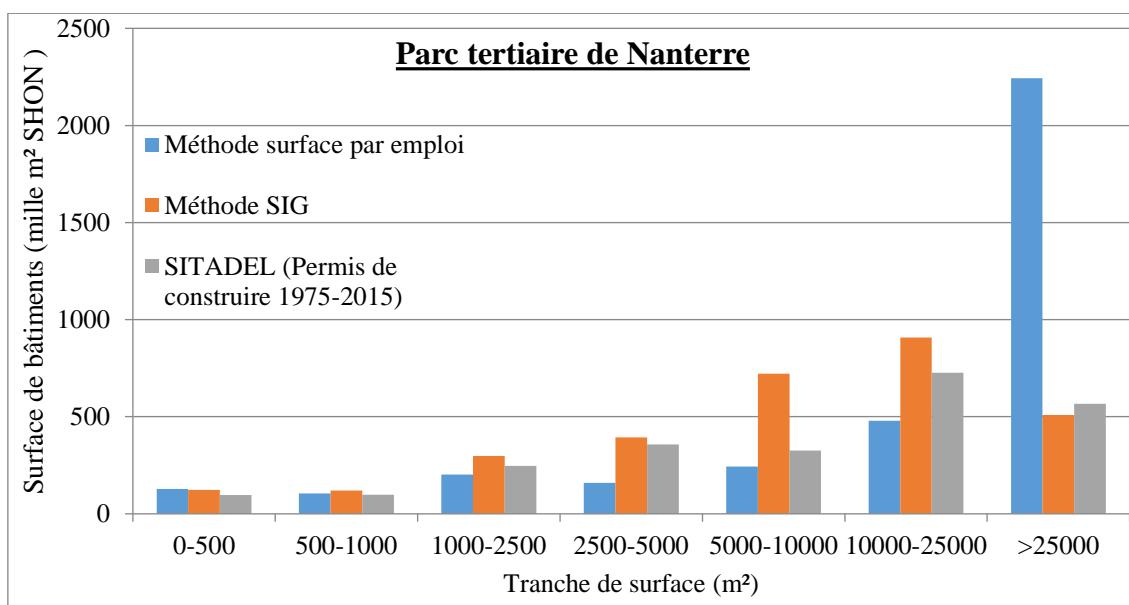


Figure 18: Comparaison des résultats des méthodes de calcul de surface par tranche SHON pour la commune de Nanterre

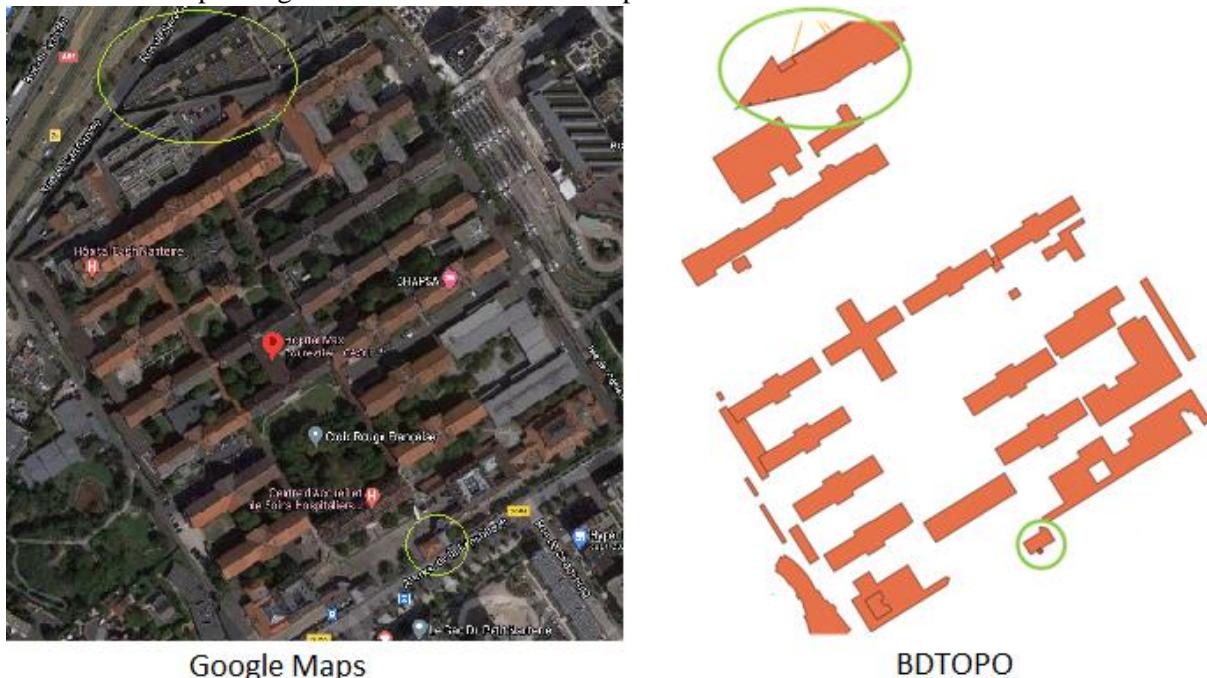
En observant la comparaison par tranche de surface (Figure 18), on remarque que la méthode de la surface par emploi donne des valeurs supérieures pour la tranche > 25000 m² et des valeurs inférieures aux deux autres sources pour les tranches de 1000 à 25000 m². Cette concentration dans la tranche la plus grande pourrait s'expliquer par la gestion administrative centralisée des emplois, et le fait qu'il y a de nombreux sièges sociaux de grandes entreprises et services publics à Nanterre.

D'autre part, la méthode SIG ne peut pas prendre en compte la surface réellement occupée par des activités du secteur tertiaire. Dans les grandes villes en particulier, les bâtiments sont partagés entre le résidentiel et le tertiaire. Quand la part de surface tertiaire à l'intérieur d'un bâtiment résidentiel n'est pas déterminée, la surface totale du bâtiment est comptabilisée pour le secteur tertiaire. Cette mauvaise comptabilité pourrait être la cause des valeurs importantes de la méthode SIG des deux tranches de 5000 à 25000 m².

En analysant la différence de surface du secteur "Bureaux", nous remarquons que les bureaux des entreprises industrielles ne sont pas pris en compte, car leurs codes APE ne les classent pas dans le tertiaire. Dans la suite, un prétraitement est établi afin de prendre en compte ces bureaux (voir Traitement des problèmes spécifiques : sièges sociaux, sites multi-bâtiments et absence de données géométriques, page 50).

Les données topographiques présentent également des anomalies telles qu'une absence complète ou une mauvaise représentation de la forme des bâtiments par rapport à la réalité. Le manque de données concerne également l'appariement d'adresses, car parfois les liens adresse-bâtiment sont absents. En conséquence, les emplois ne peuvent pas être attribués à tous les bâtiments concernés. Ce problème concerne en particulier des campus universitaires et de recherche, des ZAC, des grands sites hospitaliers et des cités administratives.

La Figure 19 illustre cette difficulté au travers de l'exemple de l'hôpital Max Fourestier à Nanterre. Seuls les deux bâtiments entourés en vert sont reliés aux adresses. Les bâtiments sans lien ne sont donc pas reconnaissables par l'algorithme d'attribution des emplois aux bâtiments.



Google Maps

BDTOPO

Figure 19: Exemple d'une zone multi-bâtiment - Hôpital Max Fourestier à Nanterre

Dans un tel cas, il y a souvent une adresse générique pour plusieurs bâtiments. On appelle ce cas "site multi-bâtiments". Il est différent du problème des adresses manquantes dans la base ADRESSE PREMIUM :

- Adresses manquantes : Un établissement a une adresse (avec ses coordonnées GPS) qui n'apparaît pas dans la base ADRESSE PREMIUM. C'est-à-dire qu'elle n'est reliée à aucun bâtiment dans la base BDTOPO. Une méthode de création de lien est décrite dans la section Traitement des problèmes spécifiques : sièges sociaux, sites multi-bâtiments et absence de données géométriques (page 50).
- Sites multi-bâtiments : Un établissement dans un site multi-bâtiments possède une adresse dans la base ADRESSE PREMIUM. Mais, cette adresse n'est pas reliée à tous les bâtiments où se trouvent les emplois. Un traitement spécifique doit être conçu pour ce problème.

Les anomalies, que nous avons détectées, se manifestent par les écarts importants entre les deux évaluations de la surface. Par exemple : dans le cas d'un site multi-bâtiments, à cause du manque des liens adresses-bâtiments, la surface estimée avec la méthode surface par emplois est très grande par rapport à celle estimée avec la méthode SIG. Suite à cette observation, nous proposons une combinaison des deux méthodes pour la meilleure évaluation possible de la surface. Pour cela, nous allons affiner la comparaison en nous plaçant à l'échelle du bâtiment et nous tenterons de formuler des hypothèses pour arbitrer entre les 2 méthodes. SITADEL ne donnant pas d'information à l'échelle du bâtiment, la

comparaison se limite à la confrontation entre les deux méthodes et une vérification in situ permettra de valider ou invalider les hypothèses d'arbitrage.

Pour réaliser cette confrontation, les estimations de surface vont être reportées sur un graphique X-Y (Figure 20), avec la surface de la méthode SIG sur l'axe X et la surface par emploi sur l'axe Y. Chaque point représente un bâtiment. L'exemple porte sur les bâtiments d'enseignement mais une telle représentation a été réalisée pour tous les secteurs.

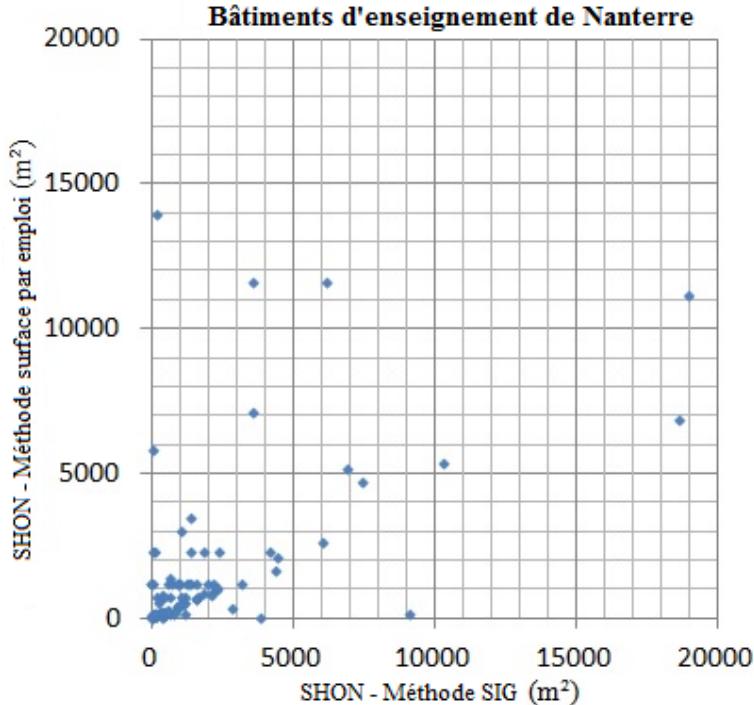


Figure 20: Confrontation entre deux méthodes d'estimation de la surface

Comme on le constate, les points sont très dispersés dans la Figure 20 ; idéalement ils devraient être proches de la bissectrice. Nous proposons de formuler des hypothèses pour expliquer les différences puis de choisir la meilleure méthode. Ce diagnostic sera ensuite validé par l'observation des bâtiments réels.

Par exemple, il est logique de penser que pour les bâtiments mixtes résidentiel-tertiaires, la méthode surface par emploi est plus pertinente que la méthode SIG. En conséquence, nous pourrions établir une règle selon laquelle chaque fois qu'on détecte un bâtiment mixte, on utilise la méthode surface par emploi. De telles règles seront adaptées au moins par type de bâtiment (bureaux, écoles, hôpitaux, etc.).

Si on observe que la méthode surface par emploi donne une valeur plus faible que celle du SIG ; deux causes sont possibles :

- Le bâtiment est mixte résidentiel-tertiaire (majoritairement résidentiel).
- Le bâtiment est tertiaire, mais une partie des emplois est déclarée ailleurs, au siège social par exemple.

Si une surface SIG est plus faible que celle évaluée par la méthode surface par emploi ; les possibilités sont :

- Il s'agit d'un siège social avec beaucoup d'employés hors du siège, ou bien l'établissement est un site multi-bâtiments.
- Il s'agit d'anomalies dans les données topographiques qui faussent la géométrie et suppriment certains bâtiments

Dans les deux cas, des erreurs liées à la méthode d'attribution des emplois au bâtiment sont aussi une cause potentielle.

Le nombre important d'explications possibles des écarts entre deux valeurs conduit à éliminer certaines causes d'écarts, dont celles qui sont liées spécifiquement aux données. Les traitements suivants sont donc mis en place :

- Traitement préalable des anomalies consistant en un mauvais découpage géométrique et/ou au manque de données géométriques de certains bâtiments
- Etablissement des liens adresse(s)-bâtiment(s) pour les sites multi-bâtiments par intégration d'un nouveau jeu de données de la BDTOPO qui s'appelle ZONE ACTIVITE

Quelques hypothèses sont nécessaires pour ces traitements. Elles seront formulées à partir de l'analyse détaillée des bases de données et de l'observation des bâtiments réels.

*2.3. Eléments de validation par sondage *in situ**

Echantillon d'observation

Une observation directe (confrontation entre bâtiment modélisé et bâtiment réel via la géolocalisation) permet de confronter la description des bâtiments dans notre base à la réalité. Nous pouvons alors :

- Analyser et caractériser les bâtiments multifonctionnels.
- Valider la méthode d'attribution des emplois aux bâtiments.
- Valider/modifier les hypothèses : par exemple, la hauteur d'étage de 3 m pour tout bâtiment.
- Diagnostiquer des problèmes de reconstitution du parc et repérer des anomalies dans les données SIG.

Un échantillon a été prélevé dans la base descriptive des bâtiments tertiaires de l'agglomération d'Orléans, qui regroupe 22 communes. Le choix de ce territoire est justifié par le fait qu'il possède une population de bâtiments suffisamment hétérogène en termes d'activités économiques, de répartition spatiale (centre urbain, zones commerciales et industrielles) et périodes de construction. Un groupe de 20 à 50 bâtiments est sélectionné par tirages aléatoires pour chaque catégorie de construction, de sorte que chaque tranche de surface soit représentée. S'il y a moins de 30 bâtiments dans une catégorie, on prend tous ces bâtiments présents dans le territoire. L'échantillon constitué se présente de la manière suivante :

| Catégorie de construction | Nombre de bâtiments |
|---------------------------|---------------------|
| Artisanat | 36 |
| Bureaux | 46 |
| Commerces | 52 |
| Enseignement | 52 |
| Entrepôt | 36 |
| Hébergement | 29 |
| Loisir culture | 33 |
| Santé | 39 |
| Social | 35 |
| Spécial | 24 |
| Transport | 32 |

Tableau 9: Nombre de bâtiments par catégorie de construction dans l'échantillon d'observation

L'observation des bâtiments réels est effectuée sur Google Maps (Street View et Satellite). En cherchant l'adresse de chaque bâtiment, nous observons le bâtiment le plus proche de la description indiquée dans notre base (provenant de BDTOPO).

Quelques statistiques sur l'échantillon :

- **Usages de bâtiments**

| Usage | % sur 414 bâtiments | Nombre |
|-------------------------------|---------------------|--------|
| Bâtiment tertiaire | 68.1% | 282 |
| Mixte Résidentiel/Tertiaire | 20.0% | 83 |
| Inobservables sur Google Maps | 8.5% | 35 |

Tableau 10: Vérification de l'usage tertiaire via notre sondage *in situ*

- **Erreurs dans les bases de données**

| Problèmes liés aux données | % sur 414 bâtiments | Nombre de bâtiments |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Mauvaise géométrie du bâtiment | 8% | 33 |
| Adresse imprécise | 11% | 45 |
| Total | 19% | 78 |

Tableau 11: Quantification des erreurs dans les bases de données

Vérification du nombre d'étages et formulation de nouvelles hypothèses

Le nombre d'étages influence beaucoup la surface du parc. C'est la raison pour laquelle l'hypothèse de hauteur d'étage doit être vérifiée attentivement. On cherche des catégories de construction pour lesquelles l'hypothèse de 3 m (utilisée jusqu'à présent) serait contestable. Via le sondage, le nombre d'étages observé est comparé à notre estimation. La différence (illustrée en Tableau 12) entre les deux valeurs est divisée en trois tranches :

$\Delta < 2$ étages, $2 \leq \Delta < 4$ et $4 \leq \Delta$

Avec : $\Delta = |n_{\text{et}}^{\text{observé}} - n_{\text{et}}^{\text{estimé}}|$; n_{et} : nombre d'étages

- **Nombre d'étages**

Rappel Notre hypothèse initiale : hauteur d'étage = 3 m

| Différence entre le nombre d'étages estimé et observé | % sur 379 bâtiments (414 - 35 inobservables) | Nombre de bâtiments |
|---|--|---------------------|
| $\Delta < 2$ | 22.16% | 84 |
| $2 \leq \Delta < 4$ | 9.50% | 36 |
| $4 \leq \Delta$ | 2.37% | 9 |

Tableau 12: Comparaison du nombre d'étages estimé avec $h = 3$ m et observé - sondage *in situ*

Comme le nombre de bâtiments dans l'échantillon diffère d'une catégorie à l'autre, on ne compare que des valeurs relatives. La Figure 21 montre le pourcentage en nombre de bâtiments des écarts sur le nombre d'étages.

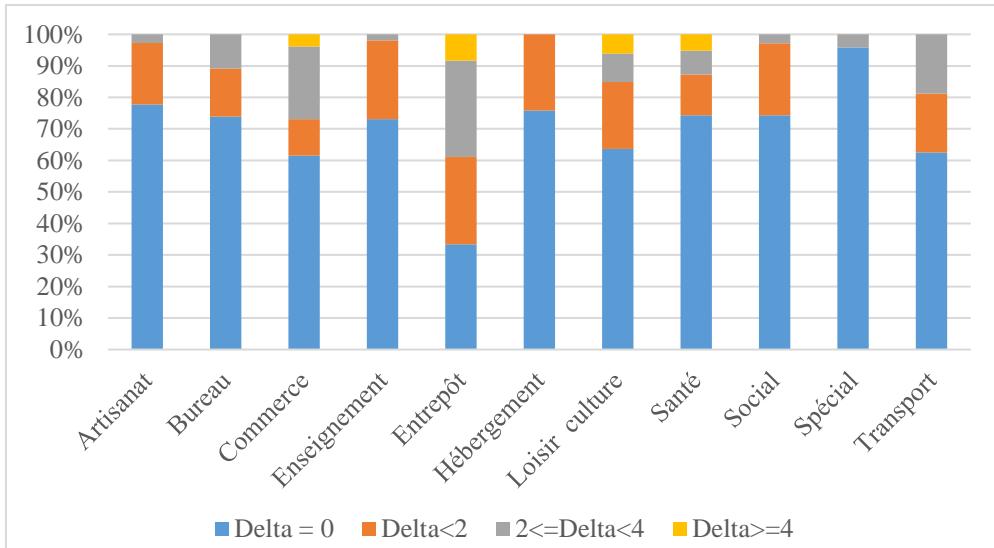


Figure 21: Pourcentage de bâtiments par catégorie de construction qui présentent des écarts sur le nombre d'étages

Nous constatons dans la Figure 21 que l'hypothèse $h = 3$ m est acceptable pour la majorité des bâtiments observés, surtout ceux dans les catégories « Artisanat », « Bureaux », « Enseignement », « Hébergement », « Social », « Santé » et « Spécial ».

La catégorie « Entrepôt » présente le maximum d'écarts sur la hauteur d'étages, suivi par les catégories « Commerces », « Loisirs et culture » et « Transport ». L'observation des bâtiments de ces catégories montre que :

- Les entrepôts, dont l'emprise au sol est importante (supérieure à 500 m²), sont des bases logistiques. Ils n'ont souvent qu'un seul niveau dont la hauteur d'étage est de 6 à 10 m. Pour les très grands bâtiments, par exemple la base logistique d'Amazon (observée dans l'agglomération d'Orléans), dont l'emprise au sol est supérieure à 5000 m.
- Les commerces qui ont des écarts importants sont les grands supermarchés (emprise au sol de 1000 m² à 2500 m²) ou des hypermarchés (emprise au sol supérieure à 2500 m²). Leur hauteur se trouve entre 6 et 8 m, ce qui correspond à la description dans [39].
- Les bâtiments de loisirs et culture sont très divers. Les cas où les écarts sont les plus importants sont les salles de sport. S'il y a plusieurs niveaux, la hauteur d'étage peut d'ailleurs varier en fonction du niveau.
- Les écarts de hauteur d'étage sont importants dans les gares dont la hauteur varie entre 4 et 6 m. Il y a aussi certains entrepôts qui sont comptabilisés pour la catégorie transport.

A partir de ces constatations, on peut formuler de nouvelles hypothèses (voir Tableau 13) permettant d'estimer la hauteur d'étage pour ces 4 catégories, en prenant en compte l'emprise au sol (ES) et la hauteur du bâtiment (H). Pour les autres catégories, nous conservons la hauteur d'étage à 3 m.

| Catégorie de construction | Emprise au sol (ES) | Hauteur du bâtiment (H) | Hauteur d'étage |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Entrepôt | $ES \leq 500 \text{ m}^2$ | Toute hauteur | 3 m |
| | $500 \leq ES \leq 5000 \text{ m}^2$ | Toute hauteur | 7 m |
| | $ES \geq 5000 \text{ m}^2$ | $H > 20 \text{ m}$ | 7 m |
| | $ES \geq 5000 \text{ m}^2$ | $H \leq 20 \text{ m}$ | = Hauteur du bâtiment |
| Commerce | $ES \leq 1000 \text{ m}^2$ | Toute hauteur | 3 m |
| | $1000 \leq ES \leq 5000 \text{ m}^2$ | Toute hauteur | 6 m |
| | $ES \geq 5000 \text{ m}^2$ | $H > 20 \text{ m}$ | 6 m |
| | $ES \geq 5000 \text{ m}^2$ | $H \leq 20 \text{ m}$ | = Hauteur du bâtiment |
| Loisir et culture | $ES < 2500 \text{ m}^2$ | Toute hauteur | 3 m |
| | $ES \geq 2500 \text{ m}^2$ | $H > 20 \text{ m}$ | 3 m |
| | $ES \geq 2500 \text{ m}^2$ | $H \leq 20 \text{ m}$ | = Hauteur du bâtiment |
| Transport | $ES < 2500 \text{ m}^2$ | Toute hauteur | 3 m |
| | $ES \geq 2500 \text{ m}^2$ | $H > 20 \text{ m}$ | 3 m |
| | $ES \geq 2500 \text{ m}^2$ | $H \leq 20 \text{ m}$ | = Hauteur du bâtiment |

Tableau 13: Hypothèse reformulée de la hauteur d'étage suite au sondage *in situ*

Ces hypothèses sont maintenant appliquées aux bâtiments observés afin de tester leur validité. Les résultats sont présentés en Figure 22.

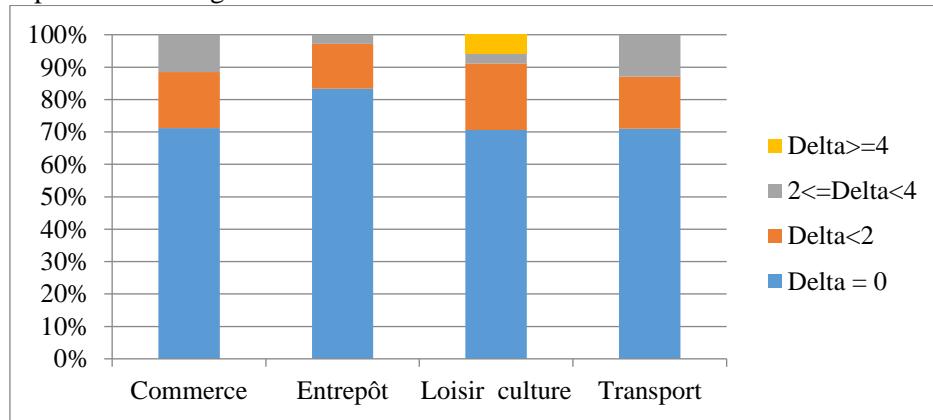


Figure 22: Test de nouvelles hypothèses sur la hauteur d'étage

Après l'ajustement des hypothèses, les écarts sont notamment réduits sur l'échantillon considéré. Néanmoins, cet échantillon est aussi celui qui a permis d'établir les nouvelles règles. D'autres observations doivent être réalisées ultérieurement afin de valider ces hypothèses sur un échantillon n'ayant pas servi à les établir.

Elaboration de règles spécifiques d'affectation de bâtiments mixtes résidentiel-tertiaire

L'existence de bâtiments mixtes tertiaire-résidentiel rend difficile l'évaluation de la surface tertiaire. Il est toutefois important de prendre en compte cette mixité, car les caractéristiques des bâtiments mixtes pourraient être différentes des bâtiments tertiaires « purs ». On commence par analyser les écarts d'estimation de surface et on constate que les résultats pour l'échantillon sont très dispersés (Figure 23).

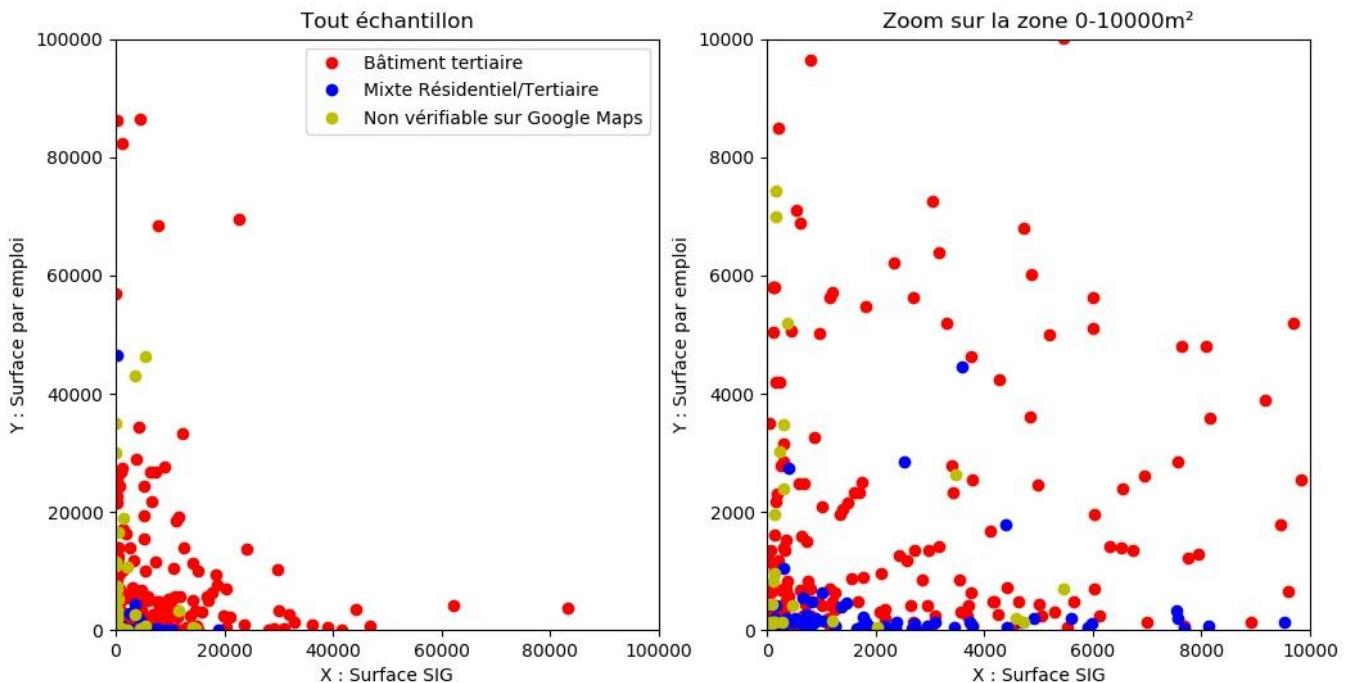


Figure 23: comparaison des deux méthodes d'estimation de la surface pour tout l'échantillon d'Orléans

Des hypothèses générales sont difficilement formulables pour repérer des bâtiments mixtes. Des singularités commencent à apparaître lorsqu'on analyse les bâtiments par catégorie de construction, mais la dispersion des points reste importante. Afin d'affiner l'analyse, on propose un graphe en $\log(Y/X)$, avec les valeurs triées par ordre croissant. Comme $\log(Y/X) = 0$ correspond à la diagonale du graphe X-Y, l'analyse de ce graphe consiste principalement à l'observation de la position des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaire par rapport à 0. Il permet de réduire la concentration des points et d'améliorer la visualisation. La Figure 24 montre un exemple de graphe en log pour la catégorie « Artisanat ».

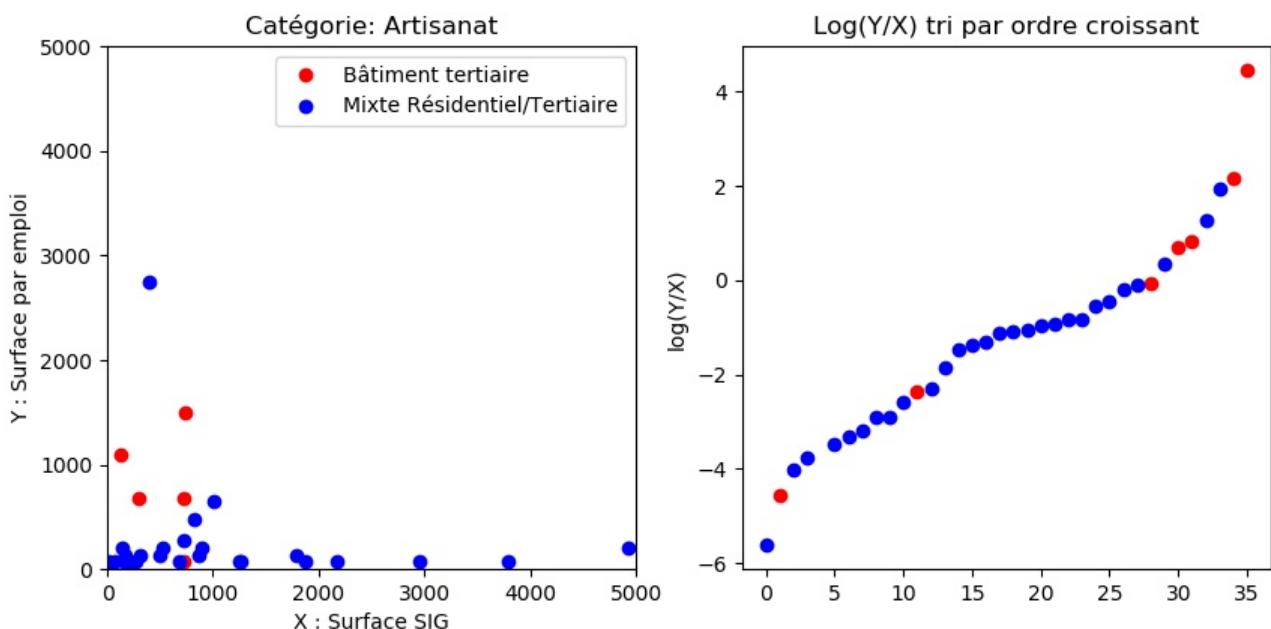


Figure 24: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Artisanat

A partir de ces deux graphes, on cherche à établir des hypothèses permettant de repérer les bâtiments mixtes. La méthode consiste à calculer la probabilité qu'on soit dans ce cas de figure à partir de

l'échantillon d'observation. Par exemple dans le cas du secteur Artisanat, on remarque par observation réelle des bâtiments que ceux-ci sont majoritairement mixtes. Suite à cette constatation, on établit une fonction de distribution pour la série des points identifiés par observation comme « mixtes » et une autre pour ceux observés comme « tertiaires purs » (Figure 25). Ces fonctions sont établies par la méthode KDE gaussien (Kernel Density Estimation), ou bien `scipy.stats.gaussian_kde` dans la bibliothèque Spicy de Python [40].

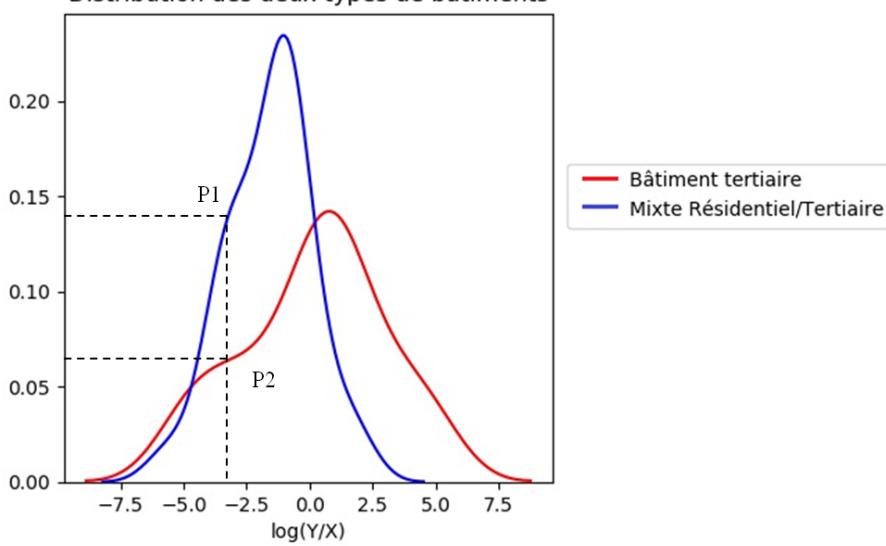


Figure 25: Fonctions de distribution de la catégorie Artisanat issues d'une observation de 36 bâtiments réels

En utilisant les fonctions de distribution obtenues de l'observation, on peut calculer la probabilité d'autres échantillons (autres communes).

Pour un bâtiment donné, on calcule $\log(Y/X)$, puis à l'aide des fonctions de distribution, la probabilité que le bâtiment soit mixte résidentiel-tertiaire (P_{mixte}) est calculée comme suit :

$$P_{mixte} = \frac{P_{mixte}(\log(Y/X))}{P_{mixte}(\log(Y/X)) + P_{tertiaire}(\log(Y/X))}$$

Avec :

$P_{mixte}(\log(Y/X))$: (P₁ en Figure 25) Probabilité du statut « mixte » à une valeur donnée de $\log(Y/X)$

$P_{tertiaire}(\log(Y/X))$: (P₂ en Figure 25) Probabilité du statut « tertiaire pur » à une valeur donnée de $\log(Y/X)$

Une fois cette probabilité calculée, on attribue le caractère « mixte » aux bâtiments ayant la probabilité la plus élevée. On pose ensuite l'hypothèse pour chaque catégorie de construction que le pourcentage de bâtiments mixtes est le même pour tout territoire.

On peut alors utiliser les ratios déduits d'une enquête. Par exemple, sur l'agglomération d'Orléans, nous avons observé que le pourcentage des bâtiments mixtes d'artisanat est 78%. Dans une autre commune où on trouvera 100 bâtiments d'artisanat, le nombre de bâtiments mixtes (comportant de l'artisanat) sera pris égal à 78 bâtiments.

Pour certaines catégories de construction telle que « Bureaux », les fonctions de distribution sont établies à partir des séries de points au sein d'une tranche de surface. Sur la Figure 24, on constate que les bâtiments, dont la surface est supérieure à 1000 m², sont purement tertiaires. L'attribution du caractère

« mixte » de cette catégorie est donc limitée à la tranche inférieure à 1000 m². La limitation de surface sur l'axe X (surface SIG) n'est pas significative, car une micro entreprise pourrait se trouver dans un très grand bâtiment résidentiel avec $X > 1000$ m². L'hypothèse posée est que l'on n'attribue le caractère « mixte » qu'aux bâtiments dont Y (surface évaluée par le nombre d'emplois) < 1000 m².

Une fois que l'on a soustrait les bâtiments de cette tranche, la méthode d'attribution devient similaire à celle de la catégorie Artisanat avec des fonctions de distribution établies par tranche de surface.

Afin d'illustrer les résultats du sondage pour les autres catégories, les figures d'analyse des catégories Bureau, Commerce, Santé et Social se trouvent en Annexes (Figure 92, Figure 93, Figure 94 et Figure 95).

Une fois un bâtiment classé comme mixte résidentiel-tertiaire, sa catégorie de construction est renommée « Mixte ». **Au sein des bâtiments mixtes, on décide que la surface occupée par des activités tertiaires correspond à l'évaluation par la méthode surface par emploi.**

2.4. Traitement des problèmes spécifiques : sièges sociaux, sites multi-bâtiments et absence de données géométriques

Les problèmes liés aux bâtiments "sièges sociaux", aux zones multi-bâtiments et aux bâtiments sans données géométriques nécessitent chacun un traitement spécifique.

Concernant les sièges sociaux, il existe, dans la base SIRENE, une variable "SIEGE" qui indique s'il s'agit d'un siège social. Cette donnée ne permet pas de conclure car toutes les microentreprises sont déclarées "siège" alors qu'elles peuvent se trouver au sein de bâtiments mixtes résidentiel-tertiaire. **Afin de qualifier un bâtiment de siège social de grande entreprise, on pose l'hypothèse arbitraire qu'il doit abriter au moins un établissement dont le nombre d'emplois est supérieur au seuil de 50.** Via ce traitement, on a aussi l'ambition de prendre en compte les sièges des grandes entreprises industrielles (code APE industriel). **Lorsqu'on détecte la présence d'un siège social au sein d'un établissement industriel (nombre d'emplois supérieur au seuil de 50), on utilise pour déterminer la surface allouée aux emplois de bureau l'activité de type "Bureaux privés hors banque, assurance et bureaux d'étude" (selon la classification du CEREN).**

Afin de traiter les zones multi-bâtiments, nous utilisons le jeu de données de BDTOPO appelé "Zone Activité". La surface de chaque zone d'activité est un regroupement des parcelles dans lequel une activité économique occupe la majorité de l'espace. Les zones d'activité sont classifiées selon les catégories suivantes : Administratif, Culture et loisirs, Enseignement, Industriel ou commercial, Gestion des eaux, Santé, Sport et Transport. On ne retient pas les catégories "Industriel ou commercial" et "Gestion des eaux", car elles couvrent en grande partie des activités non-tertiaires. Dans chaque zone d'activité, le traitement consiste à établir les liens entre adresses des établissements et bâtiments. **Les emplois sont ensuite redistribués, proportionnellement à la surface dans tous les bâtiments de la zone.**

Dans la base BDTOPO, certains bâtiments n'ont pas de données géométriques mais sont référencés (par un identifiant) et d'autres données comme l'emprise au sol (ES) et la hauteur sont renseignées. Sans information sur leur géométrie précise, on suppose que l'emprise au sol est un rectangle de surface donnée par BDTOPO ou ADRESSE PREMIUM (qui contient également certaines données des bâtiments en lien avec les adresses). Chaque rectangle est orienté nord-sud, la longueur du côté nord-sud (L) valant deux fois la longueur des côtés est-ouest. On peut donc calculer L via l'équation suivante :

$$\text{Emprise au sol} = 2 \times L^2$$

On résume à présent l'ensemble des hypothèses retenues dans le Tableau 14.

| Hypothèses de reconstitution des surfaces | Catégories concernées (ou APE concernés) | Exceptions |
|---|--|--|
| Estimation du nombre d'emplois selon la tranche d'effectif (méthode de Marty-Jourjon et al., 2018 [34]) | Toute catégorie | Non |
| Seuil d'effectif "petits" établissements (regroupant leurs emplois dans un seul local) fixé à 50 | Toute catégorie | Non |
| Hauteur d'étage à 3 m | Artisanat, Bureau, Enseignement, Hébergement, Social, Santé et Spécial | Commerce, Entrepôt, Transport, Loisir et Sport (voir Tableau 13) |
| Ratio SHON sur SHOB = 0.85 | Toute catégorie | Non |
| Ratios SHON-SU dans le Tableau 8 | | |
| Probabilité d'être mixte résidentiel-tertiaire selon le sondage <i>in situ</i> | Toute catégorie | Non |
| Etablissement qualifié de siège social par la base SIRENE avec le nombre d'emplois est supérieur à 50 | Toute catégorie | Non |
| Bâtiment qualifié de bureau, même si le code APE est industriel. Si l'établissement industriel comporte un siège social selon l'hypothèse ci-dessus | Etablissement APE industriel qualifié de siège social | Non |
| Répartition des emplois à tous les bâtiments dans une zone d'activité | Toute catégorie | Non |
| Traitement des erreurs dans les données géométriques | Toute catégorie | Non |

Tableau 14: Synthèse des hypothèses de l'étape 2

A ce stade, les bâtiments sont identifiés et caractérisés sommairement : localisation, géométrie, nature des activités abritées et surfaces dévolues à chacune d'entre elles.

3. Etape 3 : Caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments

Cette nouvelle étape consiste à distribuer les attributs permettant de déduire les caractéristiques thermiques du bâtiment. Le processus suivi au cours de cette étape est synthétisé par la Figure 26.

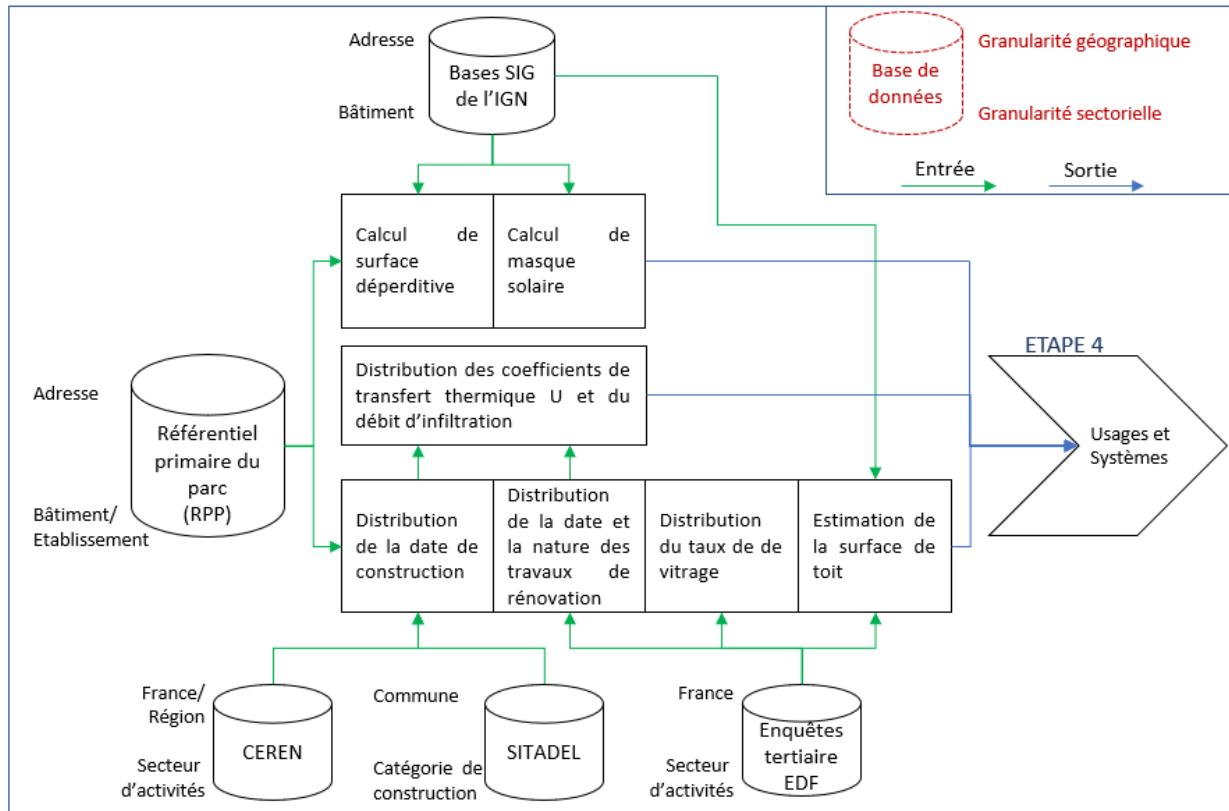


Figure 26: Schéma de l'étape 3 : Caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments

Il existe plusieurs niveaux de détail de modélisation thermique d'un bâtiment. Plus le modèle est détaillé, plus le nombre de variables descriptives augmente. Dans notre représentation de parc, la description thermique d'un bâtiment est simplifiée par manque de données. Cette simplification permet aussi de simuler la demande d'énergie d'un grand nombre de bâtiments, tout en conservant des temps de traitement réduits.

Nous cherchons à reconstituer les caractéristiques essentielles à une simulation de la demande énergétique. Les variables descriptives de l'état thermique d'un bâtiment peuvent être classées en deux familles :

| | |
|--|--|
| Caractéristiques géométriques et architecturales | volume d'air intérieur, surface déperditive, surface du toit, taux de vitrage, masques solaires |
| Caractéristiques thermiques du bâtiment | coefficient de transfert thermique, infiltrations d'air, apports solaires sur les parois opaques et les surfaces vitrées |

Tableau 15: Deux familles de variables descriptives de l'état thermique d'un bâtiment

Certaines variables sont directement calculables à partir des données SIG, notamment le volume d'air intérieur, la surface déperditive et les masques solaires. Néanmoins, l'estimation de la majorité des caractéristiques ci-dessus repose sur d'autres attributs du bâtiment. Par exemple : il est possible d'estimer les coefficients de transfert thermique (U) des murs et des surfaces vitrées, par l'intermédiaire de la date de construction, de sa catégorie, de la date de rénovation et de la nature des travaux. Le rôle des attributs intermédiaires est donc très important.

Dans cette partie, nous nous concentrerons sur deux sujets :

- Les méthodes d'affectation des attributs intermédiaires : date de construction, date et nature des derniers travaux, taux de vitrage et forme de toiture. Ces méthodes reposent sur des distributions statistiques identifiées à partir d'études ciblées, d'enquêtes et de bases de données.
- Les méthodes de calcul de caractéristiques à partir du SIG : surface mitoyenne, surface déperditive et masques solaires

3.1. Distribution de la date de construction

La méthode proposée dans cette thèse consiste à employer la base SITADEL qui contient l'historique des permis de construire sous forme de surface totale annuelle par tranche et par catégorie de construction, à l'échelle communale. Pour chaque année, la surface est classée par catégorie de construction (illustration en Figure 27) et par tranche de surface (illustration de la catégorie Bureaux en Figure 28).

Dans la base SITADEL, on dispose de la distribution des dates de construction par tranche de surface et par catégorie pour chaque commune, de 1975 à 2015. Notons que les permis peuvent avoir trois statuts différents « dépôt », « autorisé » et « commencé ». La distribution par date de construction est donc obtenue via la date des permis « commencés », en supposant qu'ils seraient tous terminés.

Le choix d'établir l'historique à partir des permis « commencé » ne permet pas de prendre en compte les désaffections, les bâtiments détruits, ainsi que les changements d'usage des bâtiments (par exemple : conversion d'un bâtiment tertiaire en résidentiel ou l'inverse).

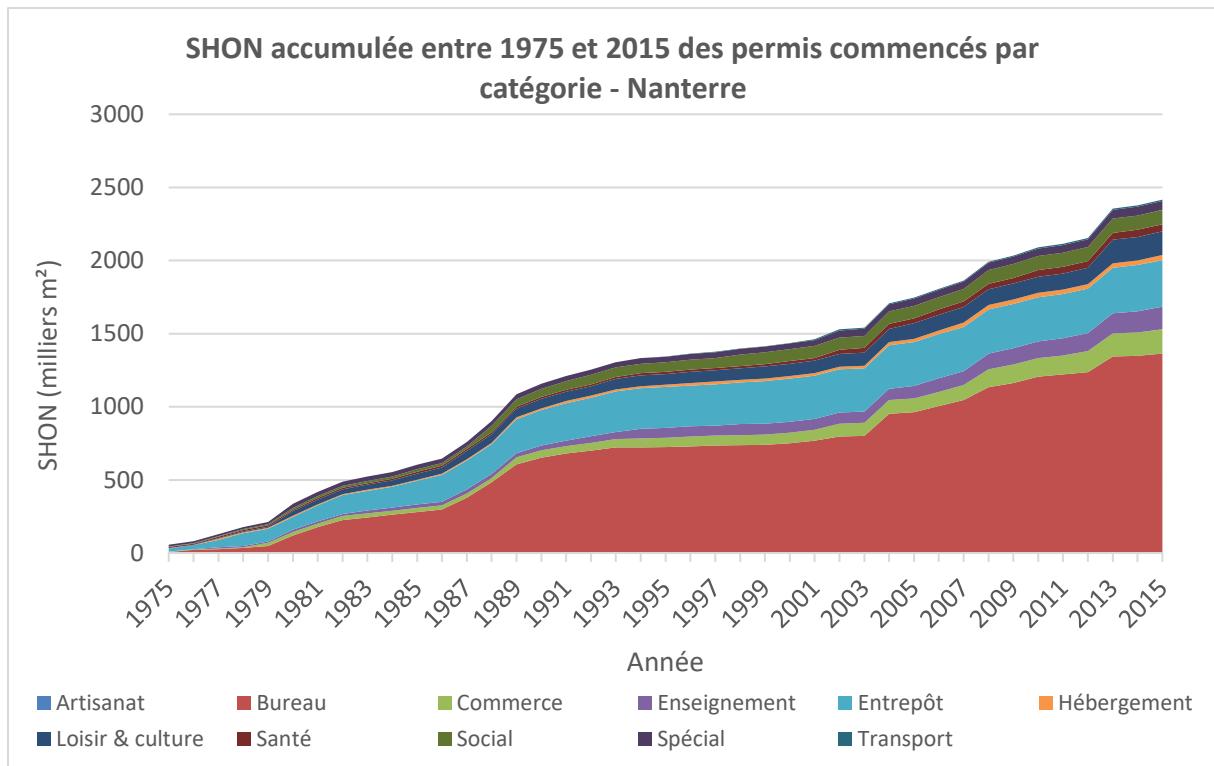


Figure 27: Cumul de surface par catégorie des permis de construire entre 1975 et 2015 – exemple de Nanterre

Répartition SHON (1975-2015) des bureaux selon les tranches - Nanterre

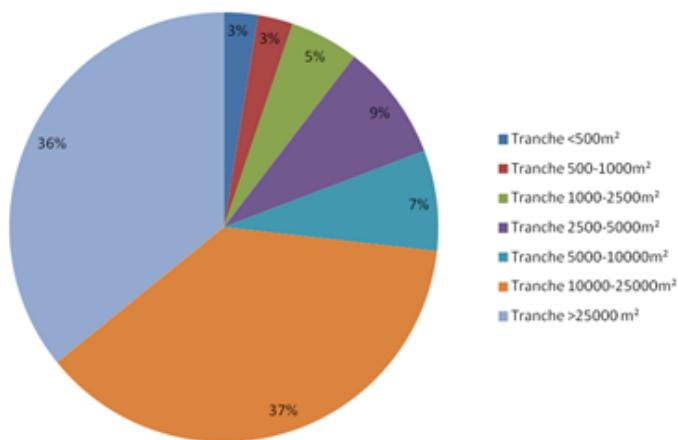


Figure 28: Répartition de la surface des Bureaux selon les tranches – exemple de Nanterre

Etant donné que la part construite avant 1975 n'est pas couverte, nous supposons que la différence entre la surface totale du parc estimée et la surface donnée par SITADEL correspond à la partie antérieure à 1975 du parc. Pour chaque catégorie de construction, nous obtenons par différence, le total des surfaces construites avant 1975. Dans certains cas, la surface estimée est inférieure à celle de SITADEL, voir la Figure 29.

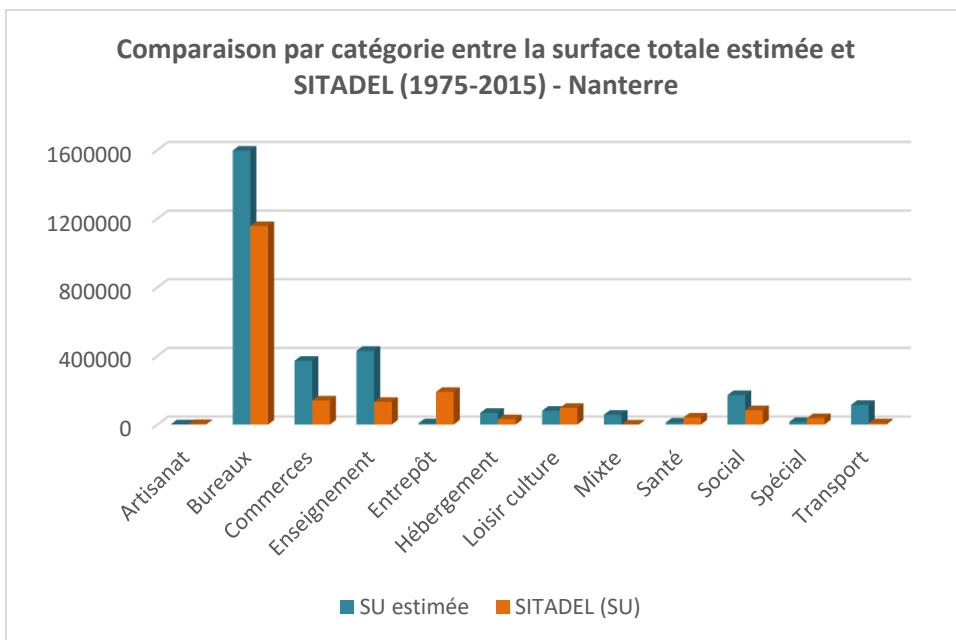


Figure 29: Exemple de l'estimation de la surface totale construite avant 1975 – Nanterre

Selon la nature de chaque catégorie de construction et chaque secteur d'activité⁸, plusieurs explications sont envisageables. Par exemple, la surface des entrepôts est sous-estimée par notre méthode. Or, cette surface peut être incluse dans la surface des commerces. Concrètement, un établissement avec un APE « commerce » peut tout à fait déposer un permis de construire pour un entrepôt. Cette hypothèse est appuyée par l'enquête d'EDF sur les commerces, qui fournit des valeurs statistiques de la proportion de surface d'entrepôt et de surface de vente, selon sa surface totale⁹. Sur la base de ces observations, nous redistribuons une partie de la surface (estimée avec notre méthode) des commerces aux entrepôts.

Ce cas particulier met une fois de plus en évidence la complexité du traitement des usages mixtes au sein des bâtiments. Il reste nécessaire de bien documenter les activités économiques au sein des bâtiments du secteur tertiaire.

Afin de pouvoir finaliser le processus de traitement engagé, nous posons une hypothèse simplificatrice pour traiter ce problème dans les autres secteurs : si la surface d'une catégorie de construction dans SITADEL est supérieure à sa surface estimée, nous supposons que sa surface construite avant 1975 est négligeable.

Ensuite, nous cherchons à répartir la surface construite avant 1975 de chaque catégorie par tranches de surface et par an. En absence de données, nous posons l'hypothèse que la répartition de la surface en tranches avant 1975 est similaire à celle de la période couverte par SITADEL. Ce choix nous est imposé par le manque de données sur la période avant 1975. Néanmoins, il pourrait introduire des erreurs de distribution, par exemple : une partie importante des immeubles de grande hauteur (qui sont pour la plupart dans la tranche de surface la plus élevée) a été construite après 1975, or si nous appliquons l'hypothèse ci-dessus une date antérieure à 1975 peut être attribuée à certains de ces bâtiments.

Nous considérons également que les bâtiments construits avant 1975 n'ont pas de différence importante en performance thermique avec ceux de 1975, car la première réglementation thermique date de 1974,

⁸ Rappelons-nous que la distribution de la catégorie de construction aux bâtiments est en fonction du code APE majeur en termes de surface chauffée estimée

⁹ Les statistiques de l'enquête des commerces d'EDF nous permettent d'obtenir les ratios selon les tranches de surface

et n'a d'ailleurs pas eu d'impact notable sur le secteur tertiaire. Nous répartissons donc cette somme de surface selon une distribution uniforme entre 1800 et 1974.

Nous obtenons finalement une répartition de la surface par date de construction et par tranche de surface complète de chaque catégorie. Nous pouvons alors affecter à chaque bâtiment, une date de construction par tirage aléatoire (comme expliqué dans l'introduction, notre méthode ne vise pas la caractérisation exacte de chaque bâtiment en particulier mais la bonne représentation statistique à l'échelle de la commune). La probabilité d'âge attribué est déterminée par la tranche de surface et la catégorie de construction du bâtiment concerné.

Par exemple : dans une commune, la composition de la tranche 1000 et 2500 m² de la catégorie santé est donnée comme suit : 25% en 1977, 60% en 2001 et 15% en 2006 ; un bâtiment de santé dans cette tranche a 25%, 60% et 15% de chance d'avoir respectivement 1977, 2001 et 2006 comme année de construction.

Cette distribution avec les données de SITADEL impose :

- une hypothèse simplificatrice : nous ne prenons pas en compte les surfaces détruites ou mutées aux autres secteurs entre 1975 et 2015
- une imprécision géographique : le modèle de tirage ne peut pas prendre en compte la géolocalisation des bâtiments
- l'année 2015 est l'année de référence de la reconstitution (seuil limite de SITADEL)

3.2. Distribution de la date et la nature des derniers travaux

Une fois la date de construction obtenue, nous établissons une méthode de distribution de la date et la nature des derniers travaux grâce aux enquêtes d'EDF (Tableau 4).

La première étape consiste à distribuer la date de rénovation. Dans les enquêtes d'EDF, nous pouvons obtenir une distribution de la date des derniers travaux en fonction de la période de construction (illustration en Figure 30).

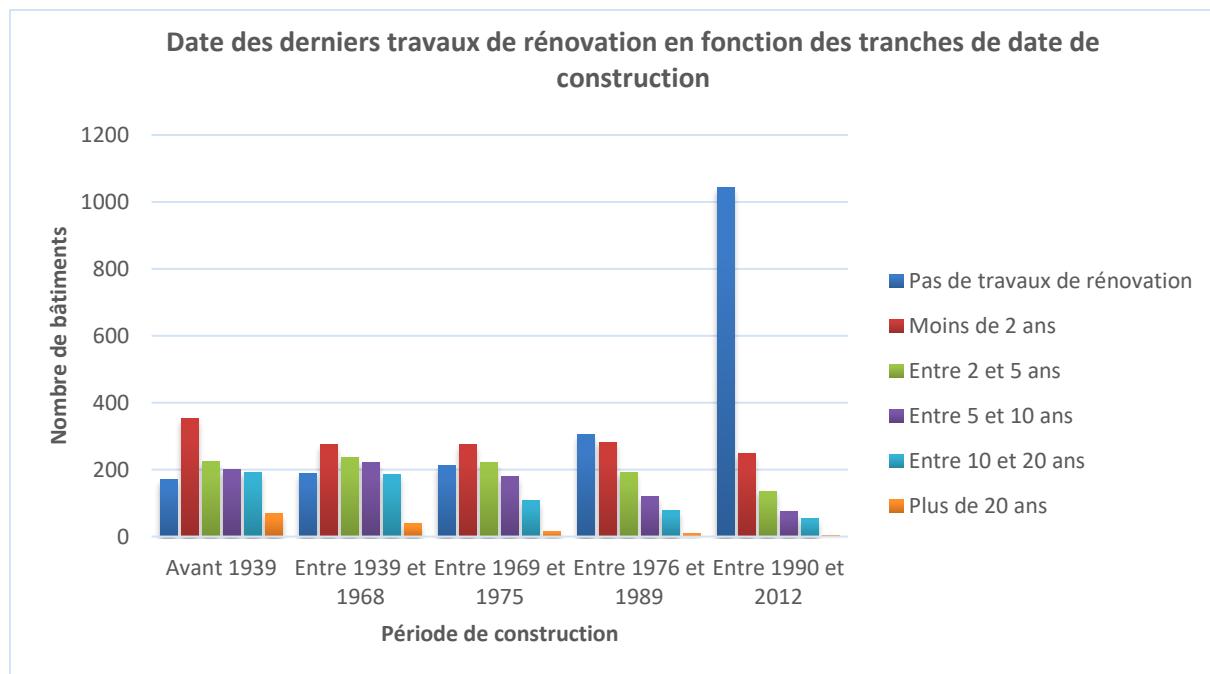


Figure 30: Distribution en fonction de la période de construction de la durée écoulée depuis la dernière rénovation (jusqu'à la date de l'enquête) - ensemble des secteurs

Dans le questionnaire des enquêtes réalisées entre 2008 et 2014, la période des derniers travaux est décrite par les réponses pré-formulées suivantes :

- Pas de travaux de rénovation
- Moins de 2 ans
- Entre 2 et 5 ans
- Entre 5 et 10 ans
- Entre 10 et 20 ans
- Plus de 20 ans

Ces enquêtes permettent d'obtenir la probabilité de travaux de rénovation en fonction de l'âge du bâtiment et de sa catégorie de construction. De même, pour chaque bâtiment, la date de rénovation est déterminée par sa tranche d'âge et sa catégorie.

La limite des enquêtes « derniers travaux de rénovation » ne permet pas de prendre en compte les travaux antérieurs. En l'absence de ressources, nous ne pouvons appliquer qu'une fois des modifications au cours de la vie d'un bâtiment.

A présent, nous allons préciser le nombre et la nature des travaux lors d'une rénovation. Dans certaines enquêtes, la nature des travaux de rénovation est classifiée en 8 types :

- Rafraîchissement (peinture, décoration intérieure, etc.) et remise aux normes (installations d'électricité et de gaz, plomberie, etc.)
- Isolation des façades
- Isolation du plancher
- Isolation du toit
- Changement de système de chauffage
- Changement de système de climatisation
- Changement de vitres
- Extension

Plusieurs types de travaux peuvent être réalisés en même temps lors d'une rénovation. Dans l'enquête sur l'hôtellerie, nous observons que le nombre de travaux est fortement influencé par la notion de « restructuration » (terme spécifique à cette enquête). En appliquant la même méthode de tirage utilisée pour la date de rénovation, nous attribuons d'abord une variable binaire « restructuration », en fonction de l'âge du bâtiment, la catégorie de construction et la date de rénovation. Ensuite, le nombre de travaux est déterminé par approche probabiliste en prenant en compte les trois attributs précédents et la variable « restructuration ». Une fois déterminé le nombre de travaux, nous distribuons la nature des travaux par la même méthode de tirage.

Nous ajoutons une règle spécifique liée au changement de vitrage : pour les bâtiments dont les huisseries n'ont pas été changées depuis 30 ans (à l'année de référence), le changement est imposé.

A la fin de ce processus, nous pouvons distinguer les bâtiments rénovés, et décrire la rénovation par la date, le nombre de travaux et le type de travaux. A nouveau, on notera que la précision géographique n'est pas possible avec cette méthode de distribution qui respecte seulement la répartition statistique à l'échelle de la commune.

3.3. Distribution du taux de vitrage

Le taux de vitrage est aussi distribué via les lois statistiques tirées des enquêtes d'EDF. Ce taux est exprimé sous forme de ratio de la surface vitrée totale sur la surface totale des façades. En utilisant la même méthode de tirage, nous distribuons ce ratio en fonction de la date et la catégorie de construction.

Notons que selon la réglementation thermique, nous appliquons un ratio minimum de parois vitrées de 17% [41].

La surface vitrée est très importante pour le calcul des apports solaires qui nécessite aussi l'orientation. Nous pouvons l'obtenir grâce aux données SIG. Pour les bâtiments du secteur tertiaire, les surfaces vitrées font parfois plus qu'apporter la lumière naturelle et des apports solaires, elles servent aussi à la visibilité (vitrines dans le cas des commerces). Les ratios de vitrage dans les bâtiments du secteur tertiaire étant encore très peu étudiés, nous nous appuyons sur la réglementation thermique et les études du secteur résidentiel. Pour améliorer la performance énergétique¹⁰, il est recommandé d'avoir une proportion de surface vitrée plus élevée sur les façades orientées Sud. Nous nous appuyons sur les valeurs de l'étude « RT 2012 et impact de la surface des parois vitrées » [42] pour établir une règle de répartition de la surface vitrée en fonction de l'orientation.

- Orientation Sud : tirage aléatoire uniforme de 25 à 65% de la surface vitrée totale
- Orientation Nord :
 - o Si la surface vitrée sud est supérieure ou égale à 50% de la surface vitrée totale : tirage aléatoire uniforme de 25 à 35% de la surface vitrée totale.
 - o Si la surface vitrée sud est inférieure à 50% de la surface vitrée totale : tirage aléatoire uniforme de 25 à 50% de la surface vitrée totale.
- Orientations Est et Ouest : nous supposons que ces deux orientations partagent à proportion égale le reste de la surface vitrée totale.

3.4. Calcul de la surface mitoyenne et la surface déperditive

A partir des données SIG, on peut obtenir la surface mitoyenne et en déduire la surface déperditive de chaque bâtiment. Pour cela, nous reprenons et améliorons une méthode existante intégrée dans l'outil SmartE. Elle consiste à déterminer les intersections entre les formes d'emprise au sol dans la base BDTOPO. Nous supposons que chaque intersection entre deux bâtiments représente une surface mitoyenne, dont la valeur est égale à la longueur de l'intersection multipliée par la hauteur du bâtiment de plus petites dimensions (illustration en Figure 31).

Ensuite, nous pouvons déduire la surface déperditive des parois opaques des façades par le calcul suivant :

$$S_{\text{déperditive façade}} = S_{\text{façade}} - S_{\text{mitoyenne}} - S_{\text{vitrée}}$$

$S_{\text{vitrée}}$: la surface vitrée totale

$S_{\text{mitoyenne}}$: la surface mitoyenne totale

$S_{\text{façade}}$: la surface totale des façades

$$S_{\text{façade}} = P_{\text{ES}} \times h_{\text{bâtiment}}$$

P_{ES} : Périmètre de l'emprise au sol

$h_{\text{bâtiment}}$: Hauteur du bâtiment

¹⁰ L'usage chauffage étant dominant.

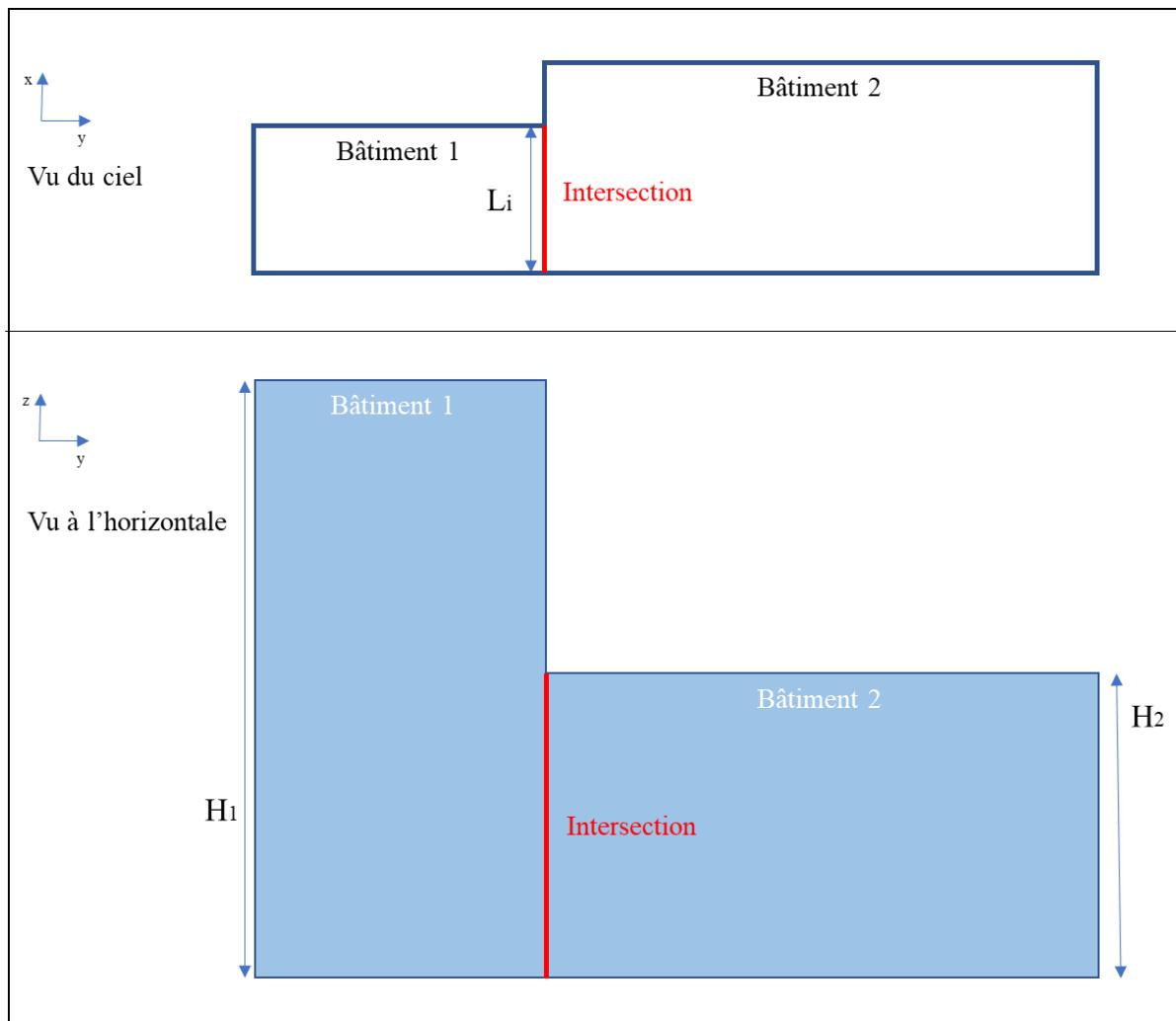


Figure 31: Illustration de la méthode de détermination de la surface mitoyenne

3.5. Estimation de la forme et de la surface de toiture

L'utilisation des données de BDTOPO impose souvent une hypothèse simplificatrice sur la forme et la surface du toit. La plupart du temps, on suppose que tous les toits sont plats, et que la surface de toiture est égale à l'emprise au sol. Or, la surface de toiture est un paramètre important pour le calcul des déperditions thermiques et pour l'estimation du potentiel d'installation de panneaux photovoltaïques.

Dans la réalité, il existe beaucoup de types de toiture (illustration en Figure 32). Le calcul de la surface de toiture est fortement dépendant de sa forme. En disposant des statistiques des enquêtes d'EDF, nous pouvons proposer une méthode d'estimation de la forme et de la surface de toit.



Figure 32: Types de toiture basiques (source : [10 Types de toitures])

L’analyse des enquêtes sectorielles permet de calculer la proportion de chaque type de toiture en fonction de la période de construction et de la surface utile des bâtiments. Même si la formulation des enquêtes est limitée à trois formes de toit (plat, en pente, et les deux), il est désormais possible de distribuer une forme de toit à chaque bâtiment en fonction de sa catégorie de construction, sa date de construction et sa tranche de surface.

Une fois la forme attribuée, la surface du toit peut être estimée. Dans le cas du toit plat, nous reprenons la valeur de l’emprise au sol. Si le toit est en pente, nous supposons qu’il a la forme d’une toiture à 2 pans caractérisée par l’orientation de la panne faîtière et l’angle d’inclinaison. Concernant l’orientation, nous posons une hypothèse simplificatrice : la panne faîtière est parallèle à la projection la plus longue du bâtiment, soit sur l’axe Nord-Sud ou soit sur l’axe Est-Ouest. Concernant l’angle, nous utilisons les valeurs à dire d’expert suivantes : 45° dans le Nord de la France et 30° dans le Sud de la France. Ensuite, la surface de toiture en pente est calculée selon la formule suivante :

$$S_{\text{toit_pente}} = \frac{S_{\text{ES}}}{\cos(A_p)}$$

S_{ES} : Surface de l’emprise au sol

A_p : Angle de la pente

Dans le cas d’une toiture qui a une partie en pente et une partie plate, on trouve dans l’enquête certains bâtiments avec la proportion de chaque forme, ce qui permet d’en déduire une distribution du ratio.

3.6. Calcul des masques solaires

Comme le calcul de surface déperditive, le processus du calcul des masques solaires est aussi issu de l’outil SmartE, qui emploie la méthode 3CL-DPE [43]. Un facteur constant annuel représentant les masques solaires est calculé pour chaque bâtiment en fonction de la morphologie urbaine. Ce calcul est basé sur une simulation d’ensoleillement sur les bâtiments dans la base BDTOPO.

Dans l’article de Garreau et al., 2019 [44], l’auteur compare cette méthode à 5 autres. Les résultats démontrent que la méthode de calcul de SmartE est un bon compromis entre précision et temps de calcul, adapté à la simulation d’une grande population de bâtiments.

3.7. Distribution des coefficients de transfert thermique U et du débit d’infiltation

Méthode de distribution des coefficients de transfert thermique U

En fonction de la date de construction, de la date et de la nature des travaux de rénovation, nous distribuons les coefficients de transfert thermique U ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) selon la réglementation thermique (RT) en vigueur.

Par exemple : Un bâtiment construit en 1990 dont les façades ont été rénovées en 2006 se voit attribuer le coefficient de transfert thermique des façades correspondant à la RT 2005, et les autres coefficients (plancher, toit et vitre) sont ceux de la RT 1988.

Etant donné que l'historique d'évolution de la performance thermique des bâtiments du secteur tertiaire est très mal documentée, nous posons une hypothèse simplificatrice : les bâtiments construits à une certaine période ont un niveau de performance thermique identique quel que soit le secteur (on suppose que les entreprises de construction emploient les mêmes techniques constructives). Cette hypothèse nous permet d'utiliser les données du secteur résidentiel bien balisé par les différentes RT. Les valeurs utilisées dans cette distribution sont issues de l'outil SmartE.

Notons que le paramétrage du modèle R6C2 de SmartE est réalisé pour chaque bâtiment à partir des coefficients U distribués et des caractéristiques géométriques du bâtiment. La déperdition par les ponts thermiques et l'inertie thermique sont prises en compte lors du processus de paramétrage.

Méthode d'estimation du débit d'infiltration

Afin de caractériser les infiltrations, nous supposons qu'elles sont strictement liées à la date de construction. Deux raisons principales sont à l'origine de cette hypothèse :

- Une grande partie des études sur les infiltrations en indexe le débit à la date de construction,
- En absence de données, nous ne pouvons pas déduire l'impact des travaux de rénovation sur ce débit.

Les valeurs de l'étude Courbothèque¹¹ d'EDF R&D sont utilisées pour la distribution du débit d'infiltrations.

Grâce aux étapes ci-dessus, les caractéristiques thermiques des bâtiments sont reconstituées. Nous cherchons dans la suite à caractériser les systèmes énergétiques et l'occupation.

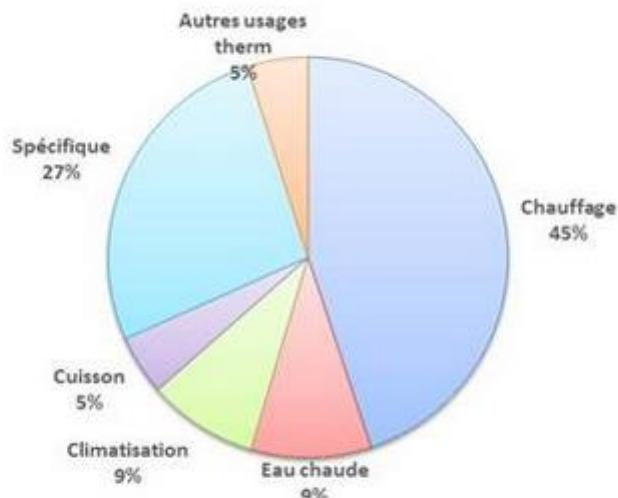
¹¹ Une compilation de simulations des bâtiments types du secteur tertiaire, accompagnée d'une étude de sensibilité

4. Etape 4 : Enrichissement des données des systèmes énergétiques

4.1. Les usages importants à modéliser

Dans cette partie, nous proposons une méthode de modélisation des usages énergétiques du secteur tertiaire via la caractérisation des systèmes énergétiques à l'échelle individuelle, dans l'objectif de représenter la demande énergétique de manière technico-explicite. Cette approche permettra dans les futures applications de replacer certains des systèmes existants par des systèmes plus performants.

**Consommation du secteur tertiaire par usage
(en pourcentage)**



Exprimées en % de la demande en Energie Finale
(PCI pour les combustibles)

Source: CEREN (2018)
Périmètre : Suivi du parc et des consommations » -
les 8 branches d'activité définie par le CEREN

Figure 33: Consommation par usage du secteur tertiaire à l'échelle nationale (source : CEREN)

L'usage énergétique le plus important du secteur tertiaire est actuellement le chauffage, qui occupe plus de la moitié de la consommation totale (illustration en Figure 33). De ce fait, beaucoup d'études ciblent cet usage et négligent les autres. Néanmoins, avec l'amélioration de l'isolation, l'importance du chauffage tend à décliner, en laissant la place aux usages spécifiques et à la climatisation, d'où l'importance de décrire les usages moins documentés. Toutefois, le niveau de détail pour chaque usage sera limité par le manque de données. Pour les mieux documentés, on peut opter pour une modélisation des systèmes alors que pour d'autres on devra se contenter de ratios.

Une très grande quantité d'usages est regroupée dans la catégorie « électricité spécifique », par exemple : éclairage, TIC (Technologies de l'information et de la communication), électroménager, ascenseurs ou escaliers mécaniques, ventilation, froid alimentaire. Etant données les ressources disponibles, il n'est pas possible d'adopter la même démarche pour tous les usages spécifiques de l'électricité.

Nous faisons le choix de traiter à part deux usages : l'éclairage et les datacenters, et de regrouper les autres usages sous une catégorie résiduelle appelée « Autres spécifiques et auxiliaires ». L'éclairage est mis à part car c'est un usage commun à tous les bâtiments, qui représente un levier important dans la maîtrise de la demande énergétique, et dont une modélisation techno-explicite est envisageable. Parmi les TIC, les datacenters sont aussi traités à part du fait de leur importante puissance installée. En effet, un datacenter consomme beaucoup d'électricité en émettant beaucoup de chaleur, il est de ce fait équipé d'un système de climatisation pour assurer une température de fonctionnement maîtrisée. La croissance des datacenters suscite de plus en plus d'attention, voir par exemple le rapport publié par l'Institut de Recherche et Développement Efficacity sur la consommation énergétique des datacenters [45].

Finalement, 7 usages sont pris en compte : Chauffage, Climatisation, Eau chaude sanitaire (ECS), Cuisson, Eclairage, Datacenter, Autres spécifiques et auxiliaires

Dans un premier temps, nous déterminons les usages présents au sein de chaque bâtiment. Certains usages sont communs car exigés par la réglementation, par exemple : le chauffage, l'ECS, l'éclairage et l'aération. Les usages tels que la climatisation, la cuisson et les TIC ne sont présents que dans une partie de la population des bâtiments. Cette présence partielle doit être prise en compte dans notre représentation du parc. Ce sera fait par tirage suivant des distributions identifiées sur la base d'enquêtes.

Dans un deuxième temps, nous déterminons, pour chaque usage, la source d'énergie principale. Pour cela, on s'appuie sur les parts de marché des différentes énergies à l'échelle locale, puis on distribue statistiquement une source d'énergie à chaque usage dans chaque bâtiment. Etant donné que le chauffage est l'usage le plus important et qu'il est déterminant pour les parts de marché, nous commençons par lui. Ensuite, nous distribuons une source d'énergie aux usages de climatisation, d'ECS et de cuisson.

Il faut aussi déterminer le type de système pour chaque usage et le caractériser par une puissance nominale et une efficacité (modèle ou simple rendement moyen). La puissance du système est estimée en fonction des caractéristiques du bâtiment et du mode d'occupation. Des consignes lui sont aussi attribuées, dépendantes de l'occupation.

Une fois encore, la fidélité de la description de chaque bâtiment à son état réel *in situ* n'est pas avérée, puisque l'attribution de la plupart des caractéristiques hors localisation et morphologie (énergie principale de chauffage, systèmes, ...) repose sur une approche statistique et probabiliste. L'enjeu est en effet, rappelons-le, d'obtenir une population de bâtiments explicitement décrits et statistiquement fiable à l'échelle la plus fine, et dans la mesure du possible, à l'échelle communale.

L'objectif de la thèse est aussi d'aboutir à une représentation techno-explicite de la demande d'énergie. Pour certains usages (chauffage, climatisation, ECS, éclairage, ...), cet objectif semble raisonnable. Pour d'autres (datacenter, cuisson, usages diffus, ...), force est de constater qu'il reste hors de portée faute de données disponibles. Nous choisissons néanmoins de les inclure dans le périmètre des usages traités, afin d'ouvrir au maximum les possibilités de comparaison de nos résultats aux statistiques de consommation d'énergie disponibles.

Le déroulement de l'étape 4 est illustré par la Figure 34.

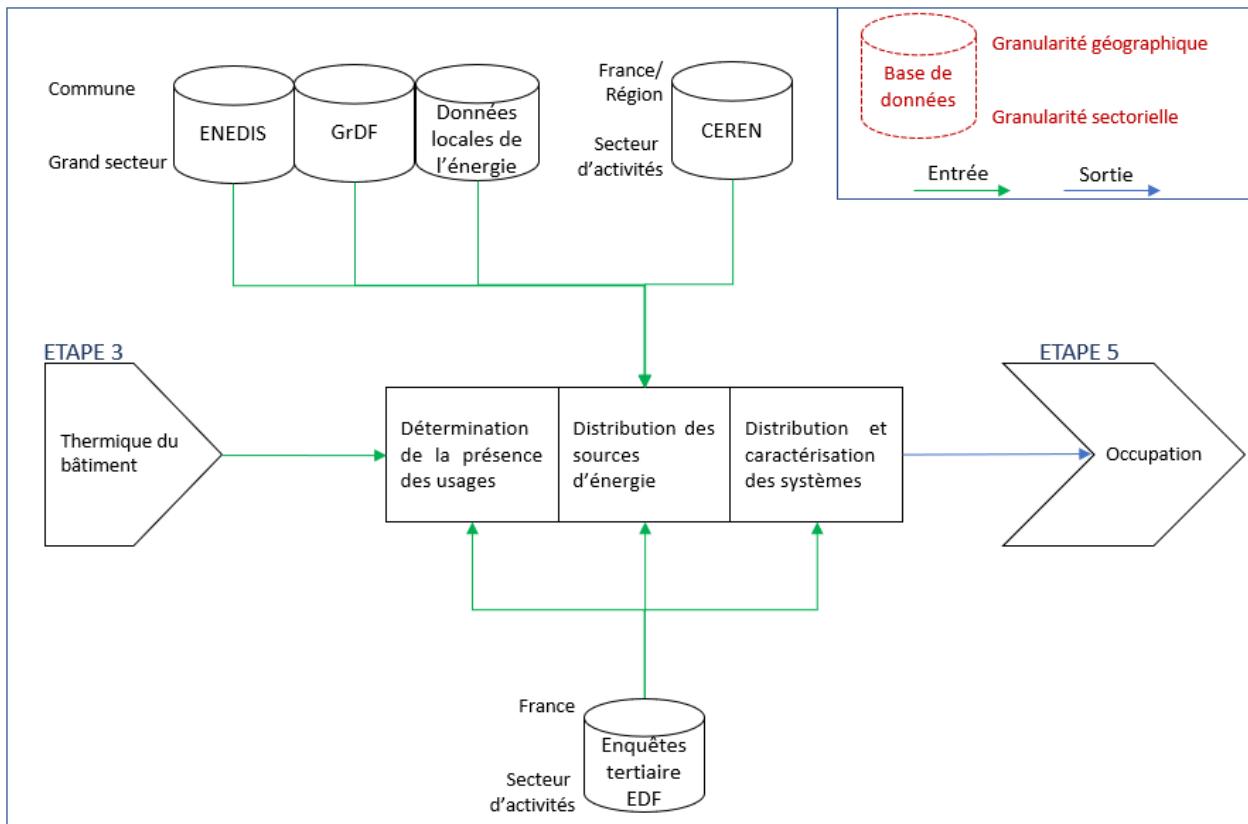


Figure 34: Schéma de l'étape 4 : Enrichissement des données des systèmes énergétiques

4.2. Présence des usages au sein de chaque bâtiment

Rappelons une fois encore que notre approche ne consiste pas à localiser précisément les usages, mais de les représenter dans le parc.

Les usages suivants sont présents dans tous les bâtiments : Chauffage, ECS, Eclairage, Autres spécifiques et auxiliaires. Concernant la climatisation, la cuisson et les datacenters, nous proposons une méthode de distribution.

Existence de climatisation et surface climatisée

Via les statistiques obtenues dans les enquêtes d'EDF, nous calculons la probabilité qu'un bâtiment soit climatisé en fonction de sa catégorie et sa date de construction. Un tirage est ensuite effectué pour chaque bâtiment selon cette probabilité pour lui attribuer le statut « climatisé » ou « non climatisé ».

Selon des statistiques des enquêtes Bureau, Enseignement, Hôtellerie et Santé d'EDF, le taux de climatisation se diffère selon les secteurs d'activité. Il est très important dans le secteur de la Santé, alors que dans l'Enseignement, c'est totalement l'inverse. Nous estimons ensuite la surface climatisée au sein de chaque bâtiment, car tous les bâtiments dotés de systèmes de climatisation ne le sont pas à 100%. L'analyse montre que parmi les bâtiments climatisés, la majorité est climatisée partiellement sauf dans l'Hôtellerie.

Une partie des bâtiments enquêtés (173 sujets) déclare un ratio surface climatisée/surface totale. Pour chaque bâtiment climatisé, nous attribuons d'abord le statut « totalement » ou « partiellement », puis affectons le ratio de surface climatisée en fonction de sa distribution selon la tranche de surface et la catégorie de construction.

Présence de datacenters et surface correspondante – Bureaux, Commerces, Enseignement et Santé

Avec la même méthode de tirage, nous identifions la présence et la surface d'un datacenter au sein de chaque bâtiment. Néanmoins, nous ne disposons pas de statistiques concernant ce sujet. Pour avancer dans la méthode et en attendant que des études soient publiées sur le sujet, nous utilisons des valeurs « à dire d'expert » rassemblées dans le Tableau 16 :

| Catégorie de construction | Tranche de surface | Probabilité de présence d'un datacenter | Ratio de surface du datacenter sur surface totale |
|---------------------------|--|---|---|
| Bureaux | 2500 m ² à 10000 m ² | 30% | 4% |
| Bureaux | > 10000 m ² | 40% | 2% |
| Commerces | > 10000 m ² | 30% | 2% |
| Enseignement | > 10000 m ² | 30% | 2% |
| Santé | > 10000 m ² | 30% | 2% |

Tableau 16: Présence estimée de datacenters dans différents secteurs

Présence des équipements de cuisson – Restaurant et traiteur ; Cantine interne – Bureaux, Enseignement, Hébergement, Loisirs, Santé, Social et Transport

Concernant les établissements de restauration, la présence de cuisine est évidente. D'autres secteurs disposent d'équipements de cuisson au service des employés mais il n'existe aucune étude sur le sujet. Nous pouvons seulement poser des hypothèses pour avancer en attente de données fiables.

Grâce à la distribution des emplois, chaque bâtiment possède un code APE majoritaire (en termes de surface estimée), qui permet d'identifier les établissements de restauration : 5610A, 5610B, 5610C

(restauration) ; ou 5621Z, 5629A, 5629B, 5630Z (Cafés, cantines, traiteurs). Ces bâtiments sont systématiquement dotés de l'usage de cuisson.

Pour les bâtiments qui ont d'autres codes APE on utilisera les probabilités estimées « à dire d'expert » du Tableau 17.

| Catégorie de construction | Tranche de surface | Probabilité d'équipements de cuisson |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Bureaux | > 1000 m ² | 40% |
| Enseignement | > 1000 m ² | 50% |
| Hébergement | > 1000 m ² | 80% |
| Loisirs & culture | > 1000 m ² | 40% |
| Santé | > 1000 m ² | 50% |
| Transport | > 1000 m ² | 80% |

Tableau 17: Présence estimée d'équipements de cuisson

4.3. Distribution des sources d'énergie

Une fois les usages identifiés dans chaque bâtiment, nous cherchons à attribuer une source d'énergie à chaque usage. Sachant que plusieurs sources d'énergie peuvent être sollicitées pour un seul usage. Limité par les ressources disponibles, il est très difficile de poser des hypothèses bien fondées sur les cas multi-énergies. Afin de simplifier la tâche, nous supposons qu'une source d'énergie principale suffit à décrire un usage.

Avant d'aborder la situation de chaque bâtiment, nous cherchons à établir la distribution des sources d'énergie utilisées au périmètre géographique considéré. Pour cela, nous sollicitons des données de la consommation énergétique à la maille locale, telles que :

- Opendata d'ENEDIS et de GrDF (maille communale)
- Données locales de l'énergie - réseaux de chaleur et de froid (maille communale)
- CEREN (maille régionale)

Malgré l'échelle géographique plus large des données du CEREN, cette source est nécessaire pour son découpage plus détaillé du secteur tertiaire (en secteurs d'activité et en usages), qui permet de désagréger les données de consommation.

4.3.1. Distribution des sources d'énergie de chauffage

La confrontation des données ci-dessous nous permet de décrire la composition du mix énergétique local : Électricité, Gaz, Fioul, Réseaux et Autres combustibles¹².

Des difficultés se présentent :

- Nous possédons seulement trois sources de données énergétiques à la maille communale : consommation de gaz, d'électricité et par les réseaux de chaleur. Dans la somme d'énergie consommée, les secteurs d'activité ne sont pas distingués, ni les usages.
- Le gaz de réseau et les réseaux de chaleur ne sont pas accessibles dans toutes les communes
- L'expression des parts de marché en m² permet de relier les sources d'énergie aux bâtiments. Mais les données du mix local ne sont fournies qu'en énergie finale consommée (ou distribuée).

Pour résoudre ces problèmes, nous proposons les solutions suivantes :

- Afin de trouver la part des autres sources d'énergie (fioul, propane, bois), nous posons l'hypothèse que leurs poids par rapport à l'électricité et au gaz sont identiques à la maille régionale et à la maille communale. Le même principe est appliqué pour séparer la part du chauffage dans la consommation communale.
- Nous supposons que lorsque la consommation de gaz ou des réseaux de chaleur est nulle, ou que la commune n'est pas référencée dans la base GrDF ou la base des données locales de l'énergie, cette commune n'est pas desservie en gaz ou en réseau de chaleur. Sa consommation de gaz de réseau dans les bâtiments tertiaire est donc réputée nulle.
- Pour attribuer une source d'énergie au chauffage dans chaque bâtiment, deux étapes distinctes sont proposées. La première consiste à estimer la consommation annuelle du chauffage de chaque source en MWh à l'échelle communale. La deuxième consiste à convertir les parts de

¹² Autres combustibles : biomasse et réseaux de chaleur

marché en m² en croisant les statistiques du CEREN et données issues de l'extraction SITADEL.

Etape 1 : estimation de la consommation annuelle de chauffage par source d'énergie

Les données suivantes sont employées pour la détermination des parts de marché communales des énergies de chauffage :

- Opendata d'ENEDIS et de GrDF: consommation annuelle à la maille communale
- Données locales de l'énergie : consommation annuelle des réseaux de chaleur à la maille communale
- CEREN (maille régionale) : consommation annuelle par secteur d'activité par énergie et par usage (MWh), surface chauffée par secteur d'activité par énergie et par usage (MWh), consommation unitaire de chauffage par type d'énergie (kWh/m²)

Dans la suite, les données ci-dessus sont notées comme suit :

$C_E^{\text{communale}}$, $C_G^{\text{communale}}$, $C_{RC}^{\text{communale}}$: consommation annuelle d'électricité (ENEDIS 2017), de gaz (GrDF 2017) et des réseaux de chaleur (Données locales de l'énergie 2017) du secteur tertiaire en MWh (maille communale)

$C_{E_chauffage}^{\text{Régionale}}$, $C_{G_chauffage}^{\text{Régionale}}$, $C_{F_chauffage}^{\text{Régionale}}$, $C_{A_chauffage}^{\text{Régionale}}$: consommation du chauffage à l'électricité, au gaz, au fioul et aux autres combustibles (CEREN 2016 – maille régionale). Dans la suite, nous notons la part d'un secteur d'activité comme suit : $C_{E_chauffage}^{\text{Régionale}}(\text{secteur})$

$P_{CE_chauffage}^{\text{Régionale}}$, $P_{CG_chauffage}^{\text{Régionale}}$, $P_{CF_chauffage}^{\text{Régionale}}$, $P_{CA_chauffage}^{\text{Régionale}}$: Part de la consommation du chauffage (en %) à l'électricité, au gaz, au fioul et aux autres combustibles dans la consommation totale du chauffage du secteur tertiaire (CEREN 2016 – maille régionale)

$$P_{CE_chauffage}^{\text{Régionale}} + P_{CG_chauffage}^{\text{Régionale}} + P_{CF_chauffage}^{\text{Régionale}} + P_{CA_chauffage}^{\text{Régionale}} = 1$$

Les variables $P_{CE_chauffage}^{\text{Régional}}$, $P_{CG_chauffage}^{\text{Régional}}$, $P_{CF_chauffage}^{\text{Régional}}$ et $P_{CA_chauffage}^{\text{Régional}}$ sont aussi disponibles pour chaque secteur d'activité (ou branche selon le lexique du CEREN). Dans la suite, nous notons la part d'un secteur d'activité comme suit : $P_{CE_chauffage}^{\text{Régional}}(\text{secteur})$

Nous avons donc pour un secteur donné, par exemple celui des bureaux (noté bur):

$$P_{CE_chauffage}^{\text{Régionale}}(\text{bur}) + P_{CG_chauffage}^{\text{Régionale}}(\text{bur}) + P_{CF_chauffage}^{\text{Régionale}}(\text{bur}) + P_{CA_chauffage}^{\text{Régionale}}(\text{bur}) = 1$$

$R_{chauffage/CE}^{\text{Régional}}$, $R_{chauffage/CG}^{\text{Régional}}$, $R_{chauffage/CF}^{\text{Régional}}$, $R_{chauffage/CA}^{\text{Régional}}$: Part du chauffage dans la consommation totale d'électricité, de gaz, de fioul et d'autres combustibles du secteur tertiaire (CEREN 2016 – maille régionale)

Remarquons que la consommation des réseaux de chaleur est incluse dans les « autres combustibles » dans les données du CEREN. Pour désagréger, le principe consiste à utiliser les ratios régionaux pour estimer les composantes de la consommation communale. La disponibilité du gaz et des réseaux de chaleur est prise en compte par des cas distincts.

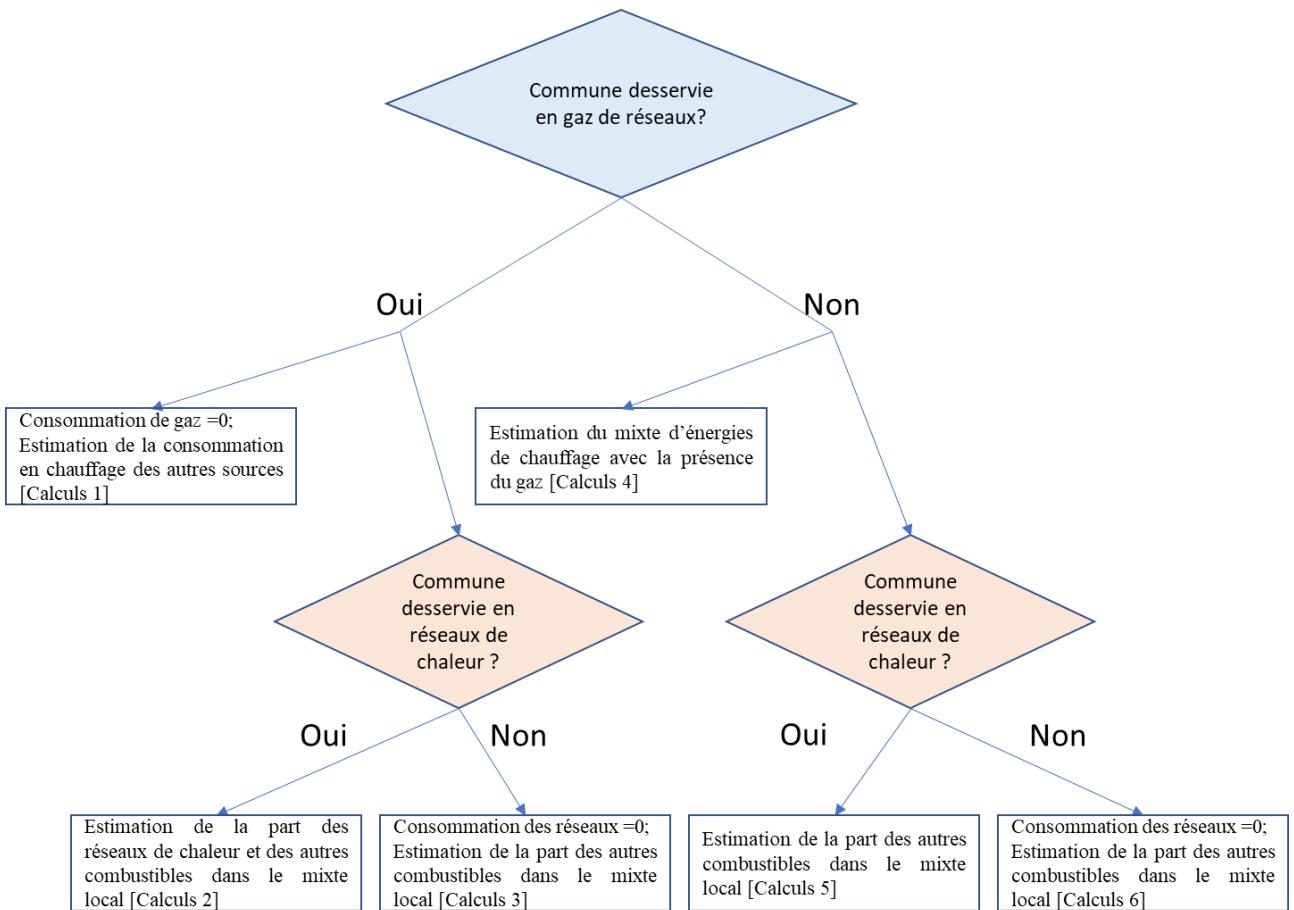


Figure 35: Distribution de l'énergie de chauffage en prenant en compte la disponibilité du gaz et des réseaux de chaleur

- **Calcul 1 :**

Dans cette configuration, nous commençons par l'estimation de la consommation de fioul, puis celle des réseaux après une vérification de leur présence dans la commune (Calcul 2 ou 3).

Nous supposons que le rapport entre la consommation (de chauffage) d'électricité et celle des autres sources à l'échelle communale soit identique qu'à l'échelle régionale. Cette hypothèse s'exprime comme suit :

$$P_{CE_chauffage}^{Communale} = \frac{P_{CE_chauffage}^{Régionale}}{P_{CE_chauffage}^{Régionale} + P_{CF_chauffage}^{Régionale} + P_{CA_chauffage}^{Régionale}}$$

Avec, $P_{CE_chauffage}^{Communale}$ est la part de la consommation du chauffage (en %) à l'électricité à l'échelle communale.

L'estimation de la consommation en chauffage des autres sources est réalisée via les calculs suivants :

$$C_{E_chauffage}^{communale} = C_E^{communale} \times R_{chauffage/CE}^{Régional}$$

$C_{E_chauffage}^{communale}$: consommation annuelle de chauffage électrique du secteur tertiaire en MWh (maille communale)

$$C_{F_chauffage}^{communale} = \frac{C_{E_chauffage}^{communale}}{P_{CE_chauffage}^{Communale}} \times P_{CF_chauffage}^{Régionale}$$

$C_{F_chauffage}^{communale}$: consommation annuelle de chauffage au fioul du secteur tertiaire en MWh (maille communale)

- **Calcul 2 :**

Nous supposons que la part des réseaux est majoritaire dans la catégorie « autres combustibles » par rapport à la biomasse. Une autre formule d'estimation de la consommation annuelle d'autres combustibles est proposée en fonction de la valeur de C_{RC} :

$$C_{A_chauffage}^{communale} = \frac{C_{RC}^{communale}}{R_A^{RC}}$$

Où R_A^{RC} est le ratio arbitraire de la part des réseaux dans la somme des « autres combustibles » donnée par le CEREN. La valeur de R_A^{RC} est supposée égale à 90%.

- **Calcul 3 :**

La consommation annuelle d'autres combustibles est calculée comme suit :

$$C_{A_chauffage}^{communale} = \frac{C_{E_chauffage}^{communale}}{P_{CE_chauffage}^{Communale}} \times P_{CA_chauffage}^{Régionale}$$

$C_{A_chauffage}^{communale}$: consommation annuelle de chauffage aux autres combustibles du secteur tertiaire en MWh (maille communale)

- **Calcul 4 :**

La consommation du chauffage est estimée de manière suivante :

$$C_{E_chauffage}^{communale} = C_E^{communale} \times R_{chauffage/CE}^{Régional}$$

$$C_{G_chauffage}^{communale} = C_G^{communale} \times R_{chauffage/CG}^{Régional}$$

$C_{G_chauffage}^{communale}$: consommation annuelle de chauffage au gaz du secteur tertiaire en MWh (maille communale)

$$C_{F_chauffage}^{communale} = \frac{C_{E_chauffage}^{communale} + C_{G_chauffage}^{communale}}{P_{CE_chauffage}^{Régionale} + P_{CG_chauffage}^{Régionale}} \times P_{CF_chauffage}^{Régionale}$$

- **Calcul 5 :**

Nous conservons la même hypothèse et le même calcul avec R_A^{RC} :

$$C_{A_chauffage}^{communale} = \frac{C_{RC}^{communale}}{R_A^{RC}}$$

- **Calcul 6 :**

$$C_{A_chauffage}^{communale} = \frac{C_{E_chauffage}^{communale} + C_{G_chauffage}^{communale}}{P_{CE_chauffage}^{Régionale} + P_{CG_chauffage}^{Régionale}} \times P_{CA_chauffage}^{Régionale}$$

Nous pouvons désormais estimer des parts de marché locales pour chaque secteur d'activité, via le rapport entre les parts de marché (tout secteur) communales et régionales de chaque source d'énergie. On suppose que ce rapport est applicable à toutes les branches. Par exemple :

$$C_{E_chauffage}^{\text{communale}}(\text{Bureau}) = C_{E_chauffage}^{\text{régionale}}(\text{Bureau}) \times \frac{C_{E_chauffage}^{\text{communale}}}{C_{E_chauffage}^{\text{régionale}}}$$

Les résultats de cette étape sont convertis en surface chauffée totale (m^2) par énergie, grâce à la consommation unitaire de chauffage par type d'énergie (kWh/m^2) issue des données du CEREN à la maille régionale

Etape 2 : évaluation des parts de marché en m^2 par source d'énergie

Cette étape consiste à distribuer l'énergie de chauffage à chaque bâtiment du parc communal en s'appuyant sur les résultats de la première étape et sur une autre extraction des données du CEREN à la maille régionale : la répartition des surfaces chauffées (m^2) en fonction de l'énergie de chauffage, du secteur d'activité, de la période de construction et des tranches de surface.

Nous employons encore une fois le principe de tirage aléatoire selon 3 découpages : le secteur d'activité, la date de construction et la tranche de surface. Pour que la distribution soit pertinente, les probabilités de ce tirage doivent être calculées en nombre de bâtiments. Or, les parts de marché des énergies de chauffage estimées sont en m^2 de surface chauffée par tranche de surface. On estime le nombre de bâtiments par l'arrondi de la surface totale de la tranche (CEREN) divisée par la surface moyenne de cette tranche (SITADEL).

- **Boucle de distribution et convergence par itérations successives**

Pour rappel, les statistiques CEREN sur la date de construction et la tranche de surface sont à l'échelle régionale. Il faut donc faire converger par itérations successives les résultats de tirage vers les parts de marché local des énergies de chauffage calculées à l'étape 1. Un critère de convergence doit être introduit car elle devient très difficile (nombre de tirages trop élevé) dans certains cas, notamment pour des petits secteurs d'activité. A chaque itération, ce critère de convergence est comparé au ratio suivant :

$$\text{Ratio de comparaison sectoriel} = \frac{\sum_{\text{type énergie } 1}^n (\sum \text{surfaces tirées} - \text{surface totale estimée})}{\text{surface totale du secteur}}$$

Lorsque le ratio de comparaison sectoriel est inférieur au critère de convergence, la boucle s'arrête.

En supposant que l'écart causé par les « petits » secteurs est marginal, nous fixons une valeur du critère de convergence par tranche de surface totale de la branche d'activité :

| Critère de convergence | Tranche de surface |
|------------------------|--|
| 10% | $S_{\text{totale}} > 500\ 000 \text{ m}^2$ |
| 15% | $200\ 000 \text{ m}^2 < S_{\text{totale}} \leq 500\ 000 \text{ m}^2$ |
| 20% | $100\ 000 < S_{\text{totale}} \leq 200\ 000 \text{ m}^2$ |
| 30% | $50\ 000 \text{ m}^2 < S_{\text{totale}} \leq 100\ 000 \text{ m}^2$ |
| 40% | $10\ 000 < S_{\text{totale}} \leq 50\ 000 \text{ m}^2$ |
| 50% | $S_{\text{totale}} \leq 10\ 000 \text{ m}^2$ |

Tableau 18: Critère de convergence de la distribution des sources d'énergie de chauffage

Lors des tests de cette méthode sur 3 communes : Nanterre, Courbevoie et Puteaux. Le calcul sur Puteaux a demandé plus de temps de calcul que les 2 autres à cause de la marginalité des secteurs autres que Bureau (75% surface).

4.3.2. Distribution de l'énergie de climatisation, d'ECS et de cuisson

Le chauffage est le seul usage pour lequel soient disponibles des parts de marché exprimées en surface et en énergie. La méthode de distribution définie pour l'énergie de chauffage n'est donc pas applicable aux autres usages.

Les enquêtes d'EDF permettent d'établir le lien entre l'énergie de chauffage et les sources d'énergie des autres usages, car une partie des bâtiments enquêtés déclarent la source d'énergie de chaque usage, notamment de la climatisation, de l'ECS et de la cuisson. En se basant sur cette source, nous pouvons donc distribuer par tirage les sources d'énergie de ces usages, en fonction des probabilités obtenues des enquêtes.

Par exemple : Considérons un bâtiment d'enseignement chauffé au gaz et climatisé. La climatisation de ce bâtiment a respectivement 84%, 14% et 2% de chances d'être à l'électricité, au gaz et fournie par un réseau de froid. Pour un autre bâtiment du même secteur chauffé à l'électricité, les probabilités passent respectivement à 97%, 1,5% et 1,5%.

Cette distribution permet de conserver le lien avec le marché local via l'énergie de chauffage. Notons que pour la climatisation, la présence des réseaux de froid est aussi prise en compte.

4.4. Caractérisation des systèmes

Avec les informations obtenues, nous pouvons désormais caractériser les systèmes de chaque usage. Le niveau de détail de la description varie en fonction des données disponibles.

4.4.1. Systèmes de chauffage

- **Type de système :**

Pour chaque source d'énergie, nous distribuons les types de système dans le tableau ci-dessous.

| Source d'énergie | Type de système |
|---------------------|--|
| Électricité | Chauffage Joule, Chaudière électrique, PAC ¹³ air-air, PAC air-eau, PAC eau-eau |
| Gaz | Chaudières gaz standard, Chaudières gaz à condensation, Chaudières gaz basse température |
| Fioul | Chaudières fioul standard, Chaudières fioul à condensation, Chaudières fioul basse température |
| Autres combustibles | Chaudières bois |
| Réseaux de chaleur | Réseaux de chaleur |

Tableau 19: Types de systèmes de chauffage

Cette distribution est réalisée par tirage en fonction de l'énergie de chauffage et en fonction de probabilités issues des enquêtes d'EDF.

- **Date d'installation :**

La date d'installation est distribuée par tirage en fonction du type de système de chauffage avec les probabilités issues des enquêtes d'EDF. Comme pour la date des derniers travaux de rénovation, cette distribution est aussi effectuée en convertissant les tranches de date en tranches d'âge.

Lorsque le changement de système de chauffage est distribué aux derniers travaux de rénovation, la date d'installation est donc identique à celle des travaux.

- **Puissance maximale de chauffage :**

La puissance de chauffage maximale est estimée pour chaque zone simulée selon la méthode R6C2 de l'outil SmartE

r_i : Résistance de convection intérieure ($K.W^{-1}$)

r_s : Résistance d'apport solaire via les murs ($K.W^{-1}$)

r_m : Résistance de conduction des murs (isolation) ($K.W^{-1}$)

r_e : Resistance de convection extérieure ($K.W^{-1}$)

r_f : Resistance équivalente aux infiltrations et aux fenêtres ($K.W^{-1}$)

$t_{ext\ min}$: Température extérieure minimale = $-10^{\circ}C$

$t_{ch\ ref}$: Température consigne chauffage de référence = $20^{\circ}C$

$P_{ch\ max}$: Puissance de chauffage maximale

¹³ Pompe à chaleur

$f_{transitoire}$: fréquence transitoire = 1 (les valeurs supérieurs à 1 permettent de surdimensionner le chauffage, et l'inverse pour les valeurs entre 0 et 1)

$$P_{ch\ max} = \left(\frac{1}{r_m + r_i + r_s + r_e} + \frac{1}{r_f} \right) \times (t_{ch\ ref} - t_{ext\ min}) \times f_{transitoire}$$

- **Rendement nominal :**

Le rendement nominal de chaque système est caractérisé par le type et la date d'installation (sources : [46], [47] et [48]), comme suit :

| Type de système | Rendement nominal |
|--------------------------------------|--|
| PAC air-air | COP ¹⁴ = 2 (avant 1990), et 2.2 (après 1990) |
| PAC air-eau | COP = 2.2 (avant 1990), et 2.5 (après 1990) |
| PAC eau-eau | COP = 2.5 (avant 1990), et 2.8 (après 1990) |
| Chauffage Joule | 1 (pour toutes les dates) |
| Chaudière électrique | 1 (pour toutes les dates) |
| Chaudières gaz standard | 0.8 (avant 1980), 0.85 (entre 1980 et 1990) et 0.87 (après 1990) sur PCS |
| Chaudières gaz à condensation | 0.9 (avant 1996), et 0.93 (après 1996) sur PCS |
| Chaudières gaz à basse température | 0.9 (avant 1990), et 0.93 (après 1990) |
| Chaudières fioul standard | 0.77 (avant 1970), 0.80 (entre 1970 et 1980), 0.83 (entre 1980 et 1990) et 0.87 (après 1990) sur PCS |
| Chaudières fioul à condensation | 0.9 (avant 1996), et 0.95 (après 1996) sur PCS |
| Chaudières fioul à basse température | 0.85 (avant 1990), et 0.9 (après 1990) sur PCS |
| Chaudières bois | 0.7 (avant 1995), 0.75 (entre 1995 et 2004) et 0.78 (après 2004) sur PCS |
| Réseaux de chaleur | 1 (pour toutes les dates) |

Tableau 20: Rendement nominal des systèmes de chauffage

Notons que le rendement des réseaux est pris égal à 1 car les pertes (production et transport) sont attribuées au secteur industrie/énergie. Concernant notre périmètre, nous prenons en compte seulement l'énergie thermique livrée par les réseaux aux bâtiments du secteur tertiaire.

- **Température de consigne de chauffage :**

Sur la base des enquêtes d'EDF, une température de consigne de chauffage comprise entre 15 et 26°C est distribuée par tirage à chaque bâtiment, en fonction de la catégorie de construction.

4.4.2. Systèmes de climatisation

- **Type de système :**

Selon l'énergie de climatisation, les systèmes suivants sont affectés :

| Source d'énergie | Type de système |
|------------------|----------------------|
| Électricité | Climatiseur air-air |
| Gaz | Machine à absorption |
| Réseaux de froid | Réseaux de froid |

Tableau 21: Types de système de climatisation

¹⁴ Coefficient de performance, ratio entre la puissance calorifique et la consommation d'électricité mesuré en conditions nominales.

Les tirages ne sont pas nécessaires dans ce cas, car il n'y a qu'un seul système par source d'énergie.

- **Puissance maximale de climatisation :**

La puissance de climatisation maximale est calculée avec les mêmes paramètres que le chauffage, mais avec les facteurs de charge interne en plus.

$t_{ext\ max}$: Température extérieure maximale = 35°C

$t_{cl\ ref}$: Température consigne climatisation de référence = 20°C

$P_{cl\ max}$: Puissance de climatisation maximale

$f_{transitoire}$: fréquence transitoire = 1

$Nb_{occ}(max)$: Nombre d'occupant maximal

P_{cui} : Puissance de cuisson (0 si non équipée)

P_{dc} : Puissance des datacenters (0 si non équipée)

S_{clim} : Surface climatisée

SU_{totale} : Surface utile totale occupée par des activités du secteur tertiaire

$$P_{cl\ max} = \frac{S_{clim}}{SU_{totale}} \times \left[\left(\frac{1}{r_m + r_i + r_s + r_e} + \frac{1}{r_f} \right) \times (t_{ext\ max} - t_{cl\ ref}) \times f_{transitoire} + 130 \times Nb_{occ}(max) + P_{cui} + P_{dc} \right]$$

Nous ajustons la puissance maximale de climatisation à la surface climatisée dans le cas où le bâtiment est partiellement climatisé.

L'apport interne de chaque occupant utilisé dans le dimensionnement est de 130 W qui comprenne la chaleur sensible (environ 55%) et la chaleur latente (environ 45%) (source : [49]).

- **Rendement nominal :**

Le rendement nominal de chaque système est caractérisé par le type et la date d'installation (source : [46], [50] et [48]), comme suit :

| Type de système | Rendement nominal |
|----------------------|---|
| Climatiseur air-air | EER ¹⁵ = 2 (avant 1990), et 2.2 (après 1990) |
| Machine à absorption | EER = 0.7 |
| Réseaux de froid | 1 (pour toutes les dates) |

Tableau 22: Rendement nominal des systèmes de climatisation

Comme les réseaux de chaleur, le rendement des réseaux de froid est aussi pris égal à 1 pour la même raison (pertes attribuées au secteur industrie/énergie).

- **Température de consigne de rafraîchissement :**

Selon les enquêtes d'EDF, la température de consigne de climatisation est comprise entre 20 et 27°C et est distribuée par tirage à chaque bâtiment climatisé, en fonction de la catégorie de construction.

4.4.3. Système de ventilation

- **Type de système :**

En utilisant les données des enquêtes d'EDF (hôtellerie et santé), nous distribuons, selon la catégorie de construction, les trois types de système de ventilation suivants : simple flux, double flux et ventilation naturelle. Concernant les autres catégories qu'hébergement et santé, nous utilisons les statistiques moyennées de l'échantillon regroupant les deux enquêtes citées.

¹⁵ Ratio d'efficacité énergétique, analogue pour le mode froid du COP en mode chaud.

- **Consigne :**

Le code du travail exige un flux d'air neuf de 25 à 60 m³/h/personne. Néanmoins, les locaux demandant un débit d'air élevé (par exemple : espace fumeur, espace d'accueil de l'hôpital) ne sont pas majoritaires. En moyenne, le débit se trouve entre 25 et 30 m³/h/personne. En prenant en considération le fait que tous les locaux ne sont pas aux normes, nous utilisons la valeur basse de 25 m³/h/personne. Ensuite, nous calculons le débit de renouvellement d'air du bâtiment via le flux d'air neuf par personne et le nombre d'occupants maximal. Etant donné que les systèmes de ventilation sont souvent pilotés en mode Tout Ou Rien, le débit de renouvellement d'air est appliqué comme consigne lorsque le bâtiment est ouvert aux occupants (selon les horaires des activités).

- **Préchauffage de l'air neuf avec les systèmes double flux :**

Le système double flux permet de préchauffer l'air neuf en récupérant la chaleur de l'air extrait. Cela permet de réduire les besoins de réchauffage de l'air neuf. Nous supposons que cette récupération permet de réduire l'écart de température entre l'air entrant et l'air sortant du système de ventilation avec une efficacité de 70 %. Le système de chauffage doit apporter le complément.

Malgré la réduction des besoins de chauffage, le système double flux a une consommation d'auxiliaires plus élevée que celle des autres systèmes de ventilation du fait de la présence d'un échangeur. Néanmoins dans cette thèse, nous ne traitons pas les auxiliaires de chaque type de système. C'est un travail complémentaire qui sera à mener dans l'avenir.

4.4.4. Systèmes d'ECS

- **Type de système :**

En utilisant les données des enquêtes, nous distribuons de la même manière que le chauffage, les types de systèmes d'ECS suivants :

| Source d'énergie | Type de système |
|---------------------|--|
| Électricité | Chaudière électrique, Chauffe-eau thermodynamique |
| Gaz | Chaudière gaz |
| Fioul | Chaudière fioul |
| Autres combustibles | Chaudière bois |
| Réseaux de chaleur | Réseaux de chaleur |

Tableau 23: Types de système d'ECS

- **Rendement nominal :**

Le rendement nominal¹⁶ de chaque système est caractérisé par le type (source : [51]) et la date d'installation, comme suit :

¹⁶ Les rendements figurés tiennent compte des pertes de distribution/stockage

| Type de système | Rendement nominal |
|-----------------------------|--|
| Chaudière électrique | 0.75 (pour toutes les dates) |
| Chauffe-eau thermodynamique | COP = 1.5 (avant 1990), et 1.7 (après 1990) |
| Chaudière gaz | 0.8 (avant 1980), 0.85 (entre 1980 et 1990) et 0.87 (après 1990) sur PCS |
| Chaudière fioul | 0.8 (avant 1980), 0.85 (entre 1980 et 1990) et 0.87 (après 1990) sur PCS |
| Chaudière bois | 0.7 (avant 1995), 0.75 (entre 1995 et 2004) et 0.78 (après 2004) sur PCS |
| Réseaux de chaleur | 1 (pour toutes les dates) Même remarque concernant les pertes |

Tableau 24: Rendement nominal des systèmes d'ECS

- **Consigne en eau chaude :**

Nous posons des valeurs de puisage en litres par occupant par jour à 60 °C pour chaque catégorie de construction, en nous basant sur les données d'Energie Plus [52]:

| Catégorie de construction | Puisage d'ECS (litres par occupant par jour à 60°C) |
|---------------------------|---|
| Artisanat | Entre 5 et 15 (moyenne 10) |
| Bureau | Entre 2 et 6 (moyenne 4) |
| Commerce | Entre 10 et 30 (moyenne 20) |
| Enseignement | Entre 5 et 15 (moyenne 10) |
| Entrepôt | Entre 2 et 6 (moyenne 4) |
| Hébergement | Entre 40 et 80 (moyenne 60) |
| Loisir-culture | Entre 20 et 40 (moyenne 30) |
| Santé | Entre 20 et 60 (moyenne 40) |
| Social | Entre 20 et 60 (moyenne 40) |
| Spécial | Entre 2 et 6 (moyenne 4) |
| Transport | Entre 5 et 15 (moyenne 10) |
| Mixte | Entre 15 et 25 (moyenne 20) |

Tableau 25: Distribution des puisages d'ECS

Pour les systèmes d'ECS, nous ne disposons pas de suffisamment d'éléments, notamment sur le dimensionnement du réservoir d'eau chaude, pour estimer la puissance installée. La consommation d'ECS est simplement représentée par le besoin généré par les occupants et le rendement du système.

4.4.5. Système d'éclairage

- **Type de système :**

En fonction de la date de construction, nous distribuons les types de système d'éclairage repérés dans les enquêtes d'EDF : Ampoules à incandescence, Halogènes, Fluocompactes, basse consommation, Tubes T5 et T8 et LED.

- **Rendement lumineux :**

Selon de différentes sources ([53], [54] et [55]), le rendement lumineux des systèmes d'éclairage (en lumen/W) a des valeurs indiquées dans le Tableau 26.

| Type de système | Rendement lumineux |
|---------------------------------|-------------------------|
| Ampoules à incandescence | Entre 10 et 20 lumen/W |
| Halogène | Entre 15 et 30 lumen/W |
| Fluocompacte basse consommation | Entre 50 et 80 lumen/W |
| T5 | Entre 50 et 100 lumen/W |
| T8 | Entre 60 et 80 lumen/W |
| LED | Entre 80 et 120 lumen/W |

Tableau 26: Rendement des systèmes d'éclairage

- Mode de régulation de l'éclairage :

A partir des statistiques de l'enquête hôtellerie (EDF) exemple ci-dessous, nous pouvons poser des hypothèses permettant d'attribuer un mode de régulation de l'éclairage. Notons que ces statistiques sont seulement disponibles dans l'enquête hôtellerie, il faut donc sélectionner pour chaque catégorie de construction une correspondance parmi les espaces dans le Tableau 27.

| Espace | Mode de régulation | | | |
|------------------|--------------------|----------|-----------|-----------|
| | Interrupeur | Minuteur | Détecteur | Gradateur |
| Accueil | 79% | 10% | 10% | 1% |
| Circulation | 50% | 27% | 22% | 1% |
| Chambre d'hôtel | 96% | 2% | 1% | 1% |
| Salle de réunion | 88% | 5% | 7% | 0% |

Tableau 27: Mode de régulation de l'éclairage

- Puissance de dimensionnement :

Nous utiliserons la méthode décrite par Xpair (source : [56]) pour estimer le dimensionnement du système d'éclairage :

$$F = \frac{E \times A}{U} \times \frac{d}{h}$$

F [lm] : est le flux lumineux à fournir,

A [m²] : est la surface du plan utile,

U : est l'utilance, caractéristique du local et du système d'éclairage définie,

E [lx] : est l'éclairement prévu pour le local,

d : est le facteur de dépréciation des lampes et luminaires

h : est le rendement des luminaires

$$P_{\text{éclairage}} = \frac{F}{\text{Rendement lumineux}}$$

Les valeurs de (d/h) pour les ampoules à incandescence, halogènes, fluocompactes, basse consommation, les tubes T5, T8 et les LED sont respectivement 1.3, 1.4, 1.5, 1.5 et 1.7.

U est défini en fonction de la valeur du paramètre K (voir Tableau 28), qui caractérise la géométrie de la zone à éclairer. K est un paramètre sans dimension, établi à partir de la formule suivante :

$$K = \frac{a \times b}{h \times (a + b)}$$

a, b et h sont les dimensions de l'espace à éclairer (illustré en Figure 36)

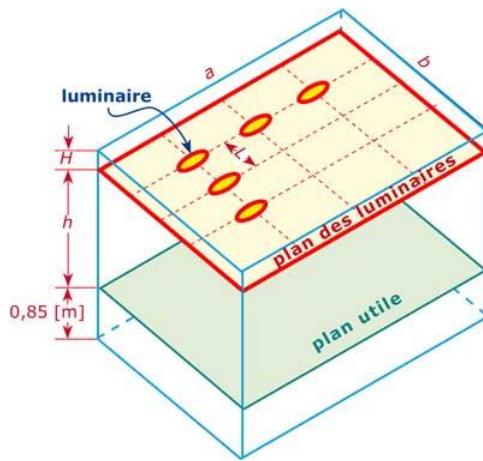


Figure 36: Dimensionnement de l'éclairage

| | Indice | $\rho_p = 0,7$ | | | $\rho_p = 0,5$ | | |
|---|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | K | $\rho_m = 0,5$ | $\rho_m = 0,3$ | $\rho_m = 0,1$ | $\rho_m = 0,5$ | $\rho_m = 0,3$ |
| ECLAIRAGE DIRECT réflecteur alu ballon fluorescent | 0,6 | $U = 0,49$ | $U = 0,42$ | $U = 0,39$ | $U = 0,46$ | $U = 0,42$ | $U = 0,39$ |
| | 0,8 | 0,58 | 0,51 | 0,48 | 0,54 | 0,51 | 0,48 |
| | 1,0 | 0,64 | 0,56 | 0,53 | 0,59 | 0,55 | 0,53 |
| | 1,5 | 0,73 | 0,64 | 0,61 | 0,65 | 0,63 | 0,61 |
| | 2,0 | 0,78 | 0,68 | 0,66 | 0,69 | 0,67 | 0,65 |
| | 2,5 | 0,81 | 0,71 | 0,69 | 0,72 | 0,70 | 0,69 |
| | 3,0 | 0,84 | 0,73 | 0,72 | 0,73 | 0,72 | 0,71 |
| | 5,0 | 0,88 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,75 | 0,74 |
| | 0,6 | 0,31 | 0,24 | 0,20 | 0,28 | 0,23 | 0,20 |
| | 0,8 | 0,39 | 0,31 | 0,28 | 0,36 | 0,31 | 0,27 |
| ECLAIRAGE DIRECT réflecteur laqué tubes fluorescents | 1,0 | 0,45 | 0,37 | 0,33 | 0,41 | 0,36 | 0,33 |
| | 1,5 | 0,56 | 0,46 | 0,43 | 0,50 | 0,45 | 0,42 |
| | 2,0 | 0,62 | 0,52 | 0,49 | 0,55 | 0,51 | 0,48 |
| | 2,5 | 0,67 | 0,56 | 0,53 | 0,58 | 0,55 | 0,53 |
| | 3,0 | 0,70 | 0,59 | 0,56 | 0,61 | 0,58 | 0,56 |
| | 5,0 | 0,76 | 0,65 | 0,63 | 0,65 | 0,64 | 0,62 |
| ECLAIRAGE DIRECT luminaire encastré tubes fluorescents | 0,6 | 0,32 | 0,27 | 0,25 | 0,30 | 0,27 | 0,25 |
| | 0,8 | 0,38 | 0,32 | 0,30 | 0,35 | 0,32 | 0,30 |
| | 1,0 | 0,42 | 0,36 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,33 |
| | 1,5 | 0,48 | 0,42 | 0,40 | 0,44 | 0,41 | 0,39 |
| | 2,0 | 0,52 | 0,45 | 0,43 | 0,46 | 0,44 | 0,43 |
| | 2,5 | 0,55 | 0,47 | 0,46 | 0,48 | 0,46 | 0,45 |
| ECLAIRAGE SEMI-DIRECT plafonnier diffuseur tubes fluorescents | 3,0 | 0,57 | 0,49 | 0,47 | 0,49 | 0,48 | 0,47 |
| | 5,0 | 0,61 | 0,52 | 0,51 | 0,52 | 0,51 | 0,50 |
| | 0,6 | 0,20 | 0,15 | 0,13 | 0,18 | 0,14 | 0,12 |
| | 0,8 | 0,26 | 0,20 | 0,17 | 0,23 | 0,19 | 0,16 |
| | 1,0 | 0,30 | 0,24 | 0,21 | 0,26 | 0,22 | 0,20 |
| | 1,5 | 0,37 | 0,31 | 0,27 | 0,32 | 0,28 | 0,26 |
| ECLAIRAGE MIXTE diffuseur verre, base ouverte ou prismatique lampe à incandescence | 2,0 | 0,42 | 0,35 | 0,32 | 0,35 | 0,32 | 0,30 |
| | 2,5 | 0,45 | 0,38 | 0,35 | 0,38 | 0,35 | 0,33 |
| | 3,0 | 0,48 | 0,40 | 0,37 | 0,39 | 0,37 | 0,35 |
| | 5,0 | 0,53 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,40 |
| | 0,6 | 0,37 | 0,30 | 0,26 | 0,33 | 0,28 | 0,24 |
| | 0,8 | 0,45 | 0,37 | 0,32 | 0,40 | 0,35 | 0,31 |
| ECLAIRAGE DIRECT-INDIRECT RECT luminaire suspendu deux tubes fluorescents | 1,0 | 0,52 | 0,42 | 0,38 | 0,45 | 0,40 | 0,36 |
| | 1,5 | 0,63 | 0,52 | 0,48 | 0,53 | 0,49 | 0,46 |
| | 2,0 | 0,69 | 0,58 | 0,54 | 0,59 | 0,55 | 0,51 |
| | 2,5 | 0,74 | 0,62 | 0,59 | 0,62 | 0,58 | 0,56 |
| | 3,0 | 0,77 | 0,65 | 0,62 | 0,64 | 0,61 | 0,58 |
| | 5,0 | 0,85 | 0,72 | 0,69 | 0,70 | 0,67 | 0,65 |
| | 0,6 | 0,21 | 0,16 | 0,13 | 0,19 | 0,15 | 0,13 |
| | 0,8 | 0,28 | 0,22 | 0,19 | 0,24 | 0,20 | 0,18 |
| | 1,0 | 0,33 | 0,27 | 0,23 | 0,29 | 0,24 | 0,22 |
| | 1,5 | 0,42 | 0,35 | 0,31 | 0,35 | 0,32 | 0,29 |
| | 2,0 | 0,48 | 0,40 | 0,37 | 0,40 | 0,36 | 0,33 |
| | 2,5 | 0,53 | 0,44 | 0,41 | 0,43 | 0,39 | 0,37 |
| | 3,0 | 0,56 | 0,47 | 0,44 | 0,45 | 0,42 | 0,39 |
| | 5,0 | 0,63 | 0,53 | 0,51 | 0,49 | 0,47 | 0,45 |

Tableau 28: Les utiliances (source : [51])

Nous utilisons les niveaux d'éclairage en lux (lumen/m²) selon la norme européenne EN 12464-1 [57] comme valeurs de E [lx] dans le Tableau 29:

| Catégorie de construction | Niveau d'éclairage (lumen/m ²) |
|---------------------------|--|
| Artisanat | 350 |
| Bureaux | 400 |
| Commerces | 400 |
| Enseignement | 350 |
| Entrepôt | 200 |
| Hébergement | 200 |
| Loisirs-culture | 300 |
| Santé | 400 |
| Social | 300 |
| Spécial | 300 |
| Transport | 300 |
| Mixte | 200 |

Tableau 29: Niveau d'éclairage demandé par catégorie de construction

4.4.6. Autres usages - représentation simplifiée

Le manque de données impose une représentation plus simple pour la cuisson, les datacenters et les autres usages spécifiques. La demande n'est pas exprimée via les systèmes mais des ratios de consommation par m² ou par repas. Bien que l'appel de puissance de ces usages soit imprécis, leurs consommations sont réparties à chaque pas de temps de la simulation pour calculer les charges internes. Selon la nature des usages, les ratios ne sont pas appliqués de la même manière. Les datacenters sont supposés fonctionner en permanence. Leur demande énergétique est donc estimée à partir d'un ratio de consommation par surface occupée. Les consommations d'énergie pour l'usage cuisson sont quant à elles directement dépendants des cycles d'activité. Faute de pouvoir réaliser une modélisation explicite de l'activité de production des repas par secteur, la demande énergétique est dans notre approche simplifiée indexée sur le rythme des occupants (nombre d'occupant à l'instant t). Les autres usages spécifiques et auxiliaires sont encore plus complexes en raison de leur caractère diffus.

Consommation de cuisson

Basée sur les données d'Energie plus [58], nous relierons la consommation de la cuisson au nombre de repas servis:

Comme le nombre de repas sera calculé par le modèle générateur d'occupation, à cette étape, on distribue seulement une valeur estimée de la consommation unitaire de la cuisson par repas :

- Restaurant : 600 (Wh/repas)
- Cantine d'entreprise : 350 (Wh/repas)
- Cafés, cantines, traiteurs : 500 (Wh/repas)

Datacenter :

Les salles informatiques et datacenters sont caractérisés par une très forte intensité énergétique, avec des puissances électriques IT par unité de surface atteignant couramment 500 à 600 W/m² (source : Efficacity [45]). Le fonctionnement de ces équipements crée de ce fait des charges internes très importantes, qui induisent un fort besoin de climatisation. La version de SmartE utilisée dans le cadre de ce travail repose sur une modélisation monozone des bâtiments. En conséquence, les charges internes associées à la climatisation des salles informatiques sont appliquées à l'ensemble du bâtiment modélisé. La simulation du bâtiment en monozone ne permet donc pas de décrire de façon adéquate la demande en climatisation des salles informatiques et datacenter. En outre, la répartition des charges internes de la

partie salle informatique/datacenter de chaque bâtiment sur l'ensemble de sa surface perturberait l'évaluation des besoins de chauffage et de climatisation hors salle informatique/datacenter. Pour pallier cette limite du monozone, nous choisissons de créer un bâtiment fictif censé représenter pour les besoins de la simulation l'ensemble des salles informatiques et datacenter de la zone géographique considérée. La demande énergétique simulée du bâtiment fictif est par la suite redistribuée à chacun des bâtiments de la zone géographique considérée au prorata de sa surface estimée de salles informatiques et datacenter.

Principales caractéristiques du bâtiment fictif « datacenter »

Le bâtiment fictif créé possède un seul niveau de 3m de hauteur. Il est de forme carrée : les 4 côtés sont d'égales longueurs et les façades sont donc d'égales surfaces, sans exposition privilégiée. Sa surface est égale à la somme des surfaces estimées de salles informatiques/datacenter de l'ensemble des bâtiments tertiaire de la zone géographique considérée. Ses coefficients thermiques (U) et le masque solaire sont calculés via la moyenne pondérée par la surface de l'ensemble des bâtiments tertiaire de la zone géographique considérée. Le taux de vitrage est supposé très faible, voire négligeable. Ce bâtiment est climatisé à 100%. La puissance informatique supposée est de 600 W par m².

Puissance d'autres usages spécifiques et auxiliaires

Nous pouvons estimer la consommation unitaire annuelle en kWh/m² par secteur d'activité, à partir des données de la consommation des usages spécifiques et de la surface par secteur du CEREN (voir Tableau 30).

| CEREN (2016) - France Métropolitaine | | | |
|---|---|----------------------------|--|
| | Consommation annuelle unitaire en kWh/m² (CU_a) | Conso totale en TWh | Surface chauffée en millions de m² |
| Bureaux | 94 | 21,1 | 225 |
| Cafés-hôtels-restaurants | 117 | 7,6 | 65 |
| Commerce | 74 | 15,8 | 212 |
| Enseignement-recherche | 19 | 3,6 | 188 |
| Habitat communautaire | 20 | 1,4 | 70 |
| Santé | 37 | 4,3 | 115 |
| Sport-loisirs-culture | 47 | 3,4 | 72 |
| Transport | 90 | 2,3 | 25 |

Tableau 30: Données du CEREN sur la consommation des usages spécifiques

Afin d'estimer la puissance installée à partir de cette consommation unitaire, nous devons estimer le nombre d'heures de fonctionnement des équipements inclus dans les usages spécifiques. Nous supposons que certains équipements sont sollicités en permanence (par exemple : froid alimentaire, certains équipements informatiques, etc.), alors que d'autres sont sollicités selon le cycle d'activité des occupants (par exemple : ascenseur, machine à café, ordinateurs personnels, etc.). Néanmoins, il faut aussi supposer la contribution de chaque groupe d'équipements dans la consommation totale, ainsi que le nombre d'heures de fonctionnement du deuxième groupe. En absence des données, nous utilisons les valeurs à dire d'expert dans le tableau ci-dessous :

| Hypothèses | | | | |
|--------------------------|--|--|--|---|
| | Consommation en permanence ($C_{spécifique_1}$) | Consommation selon les horaires de travail ($C_{spécifique_2}$) | Nombre de jours de travail par semaine (n_j) | Nombre d'heure d'ouverture par jour (n_h) |
| Bureaux | 30% | 70% | 5 | 10 |
| Cafés-hôtels-restaurants | | | 6 | 12 |
| Commerce | | | 6 | 12 |
| Enseignement-recherche | | | 5 | 10 |
| Habitat communautaire | | | 7 | 12 |
| Santé | | | 6 | 12 |
| Sport-loisirs-culture | | | 6 | 10 |
| Transport | | | 7 | 12 |

Tableau 31: Hypothèse de calcul de puissance des usages spécifiques

Pour chaque secteur d'activité, nous estimons la puissance unitaire des usages spécifique en W/m² selon le calcul suivant :

$$PU_{spécifiques} = C_{spécifique_1} \frac{CU_a \times 1000}{365 \times 24} + C_{spécifique_2} \frac{CU_a \times 1000}{n_j \times n_h \times 52}$$

Cette puissance unitaire est ensuite multipliée avec la surface utile (SU) pour déduire la puissance des usages spécifiques au sein de chaque bâtiment. Notons que dans l'usage spécifique, le CEREN inclus l'éclairage et les datacenters, qui sont distingués dans notre modèle. Afin d'éviter le double comptage, nous déduisons la puissance de datacenter et d'éclairage dans la puissance des usages spécifiques et auxiliaires estimées, comme suit :

$$P_{autres spécifiques} = PU_{spécifiques} \times SU - P_{datacenter} - P_{éclairage}$$

Néanmoins dans certains cas, la valeur estimée est bien inférieure à la somme de puissance d'éclairage et de datacenter. Dans ces cas, nous appliquons une puissance unitaire de 1 W/m² pour estimer $P_{autres spécifiques}$.

L'utilisation des ratios nationaux ne permet pas de prendre en compte les singularités à l'échelle locale, mais à l'heure actuelle les usages spécifiques sont particulièrement mal documentés.

5. Etape 5 : Caractérisation des profils d'occupation

Dans cette étape, le profil d'occupation est généré pour chaque bâtiment à partir d'une simulation des cycles d'activité des occupants (voir Figure 37).

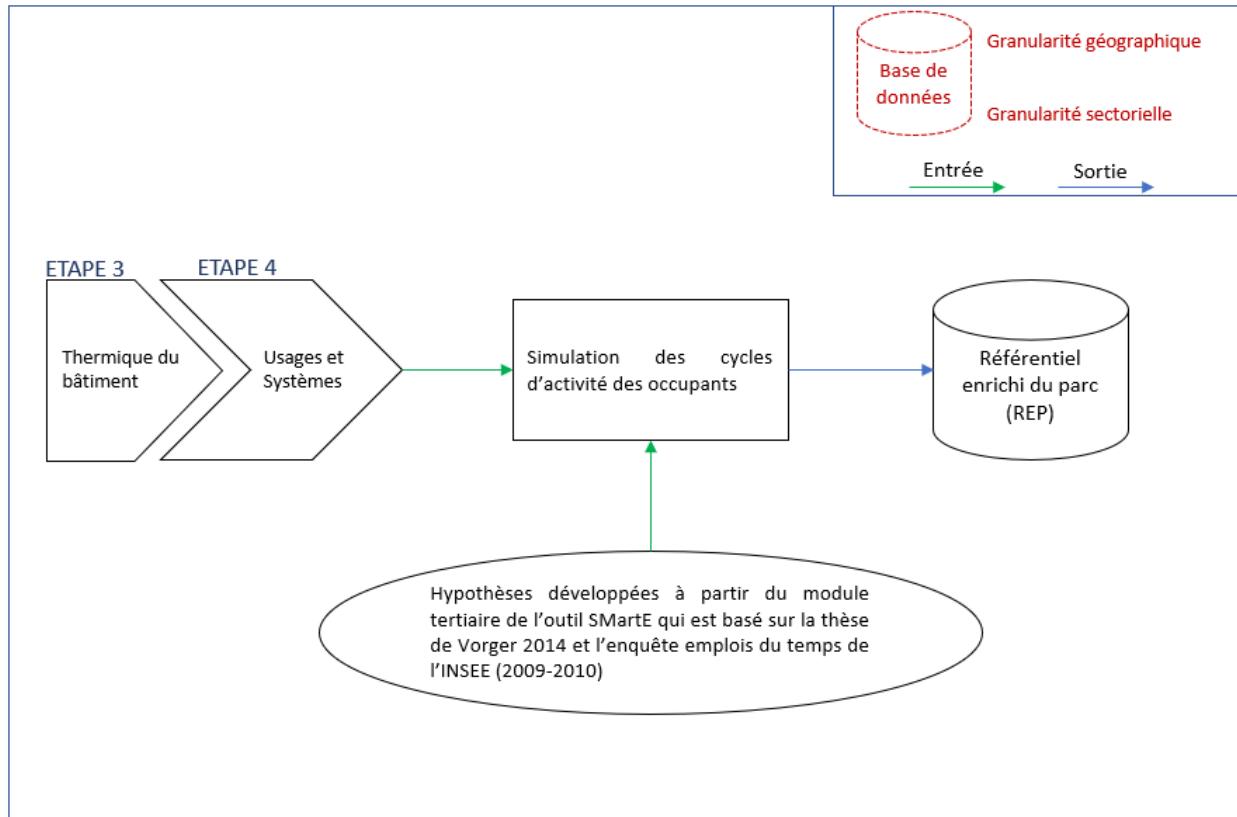


Figure 37: Schéma de l'étape 5 : Caractérisation des profils d'occupation

Cette simulation consiste à déterminer le nombre de personnes présentes dans le bâtiment à chaque pas de temps. Notre approche est inspirée du modèle d'enrichissement de l'occupation tertiaire (développé par Marty-Jourjon et Berthou) de l'outil SmartE mais il est conçu seulement pour les bureaux. Certaines adaptations ont été apportées pour d'autres secteurs lors de ce travail.

Rappelons-nous aussi que SmartE simule chaque bâtiment comme étant une seule zone. De ce fait, nous simplifions également la simulation de l'occupation par l'utilisation du code APE majoritaire (ou bien catégorie de construction en correspondance) pour représenter toute activité au sein du bâtiment. Néanmoins, le niveau de détail du parc reconstitué peut permettre de prendre en compte les spécificités de chaque type d'activité présent dans le bâtiment dans la simulation.

Simulation de l'occupation

L'occupation dans chaque bâtiment est générée selon le processus suivant :

1. Remplir les paramètres selon le secteur
2. Générer la courbe d'occupation journalière avec les horaires de début, de fin et de pause. Une distribution gaussienne permet d'éviter que tout le monde arrive à l'heure de début, ou parte à l'heure de fin (saut brusque de 0% à 100% des occupants, et inversement). Il en va de même pour la pause de midi.
3. Générer la courbe d'occupation hebdomadaire, en appliquant les taux de présence journalière (Pr_j) d'une semaine à la courbe de l'occupation journalière.

4. Générer la courbe de l'occupation annuelle, en appliquant les taux de présence mensuelle (Pr_m) d'un an aux courbes de présence hebdomadaire de chaque mois.

Les étapes de 2 à 4 sont développées dans la première version du secteur tertiaire de l'outil SmartE.

L'estimation des taux de présence dans l'outil SmartE est basée sur la thèse de Vorger, 2014 [59] et sur l'enquête Emploi du temps de l'INSEE (2009-2010) [60]. Le principe consiste à appliquer un taux de présence au nombre d'emplois, et à générer un flux de clientèle pour certaines activités. Les paramètres du modèle peuvent être remplis selon la catégorie de construction. Notons que dans cette partie, nous séparons les restaurants via leurs codes APE (5610A, 5610B et 5610C) dans le but de mieux décrire leur cycle d'activité qui est très spécifiques, ainsi que l'usage « cuisson ».

Les paramètres clés sont listés dans les tableaux Tableau 32, Tableau 33, Tableau 34 et Tableau 35 :

Temps de début du service (l'heure d'arrivée de la première personne)

| Catégorie de construction (ou code APE) | Début du service (heure d'arrivée de la première personne) |
|---|--|
| Bureaux, Mixte et Spécifique | Choix aléatoire entre 8h, 8h15, 8h30, 8h45, 9h (choix pour chaque zone simulée, mais pas pour chaque jour) |
| Enseignement | Choix aléatoire entre 7h, 7h15, 7h30, 7h45, 8h |
| Commerces, Hébergement, Entrepôts, Santé, Social et Transport | Choix aléatoire entre 7h30, 7h45, 8h, 8h15, 8h30 |
| Artisanat, Loisirs & culture | Choix aléatoire entre 8h30, 8h45, 9h, 9h15, 9h30 |
| Restaurant | Choix aléatoire entre 9h30, 9h45, 10h, 10h15, 10h30 |

Tableau 32: Paramètres de la simulation de l'occupation : Heure de début du service

Temps de fin du service (l'heure de départ de la première personne)

| Catégorie de construction (ou code APE) | Fin du service (heure de départ de la dernière personne) |
|--|--|
| Bureaux, Enseignement et Mixte | Temps de début + 10h |
| Commerces, Hébergement, Entrepôts et Social | Temps de début + 12h |
| Artisanat, Loisirs & culture, Santé, Transport et Restaurant | Temps de début + 12h |

Tableau 33: Paramètres de la simulation de l'occupation : Heure de fin du service

Début de la pause de midi

- Toute catégorie sauf restaurant : 12 h
- Restaurant : 14 h 30

Fin de la pause de midi

- Toute catégorie sauf restaurant : 14 h
- Restaurant : 17 h 30

Taux de présence journalière (Pr_j) d'une semaine (un taux pour chaque jour de la semaine, de lundi à dimanche)

| Catégorie de construction | Taux de présence journalière (Pr_j) durant une semaine | | | | | | |
|--|--|-------|----------|-------|----------|--------|----------|
| | Lundi | Mardi | Mercredi | Jeudi | Vendredi | Samedi | Dimanche |
| Bureaux et Mixte | 0.95 | 0.95 | 0.8 | 0.95 | 0.7 | 0.2 | 0 |
| Enseignement et Spécifique | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0 | 0 |
| Artisanat, Commerces, Hébergement, Entrepôts, Santé, Social et Transport | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.95 | 0.6 |
| Loisirs et culture | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.9 | 0.9 |
| Restaurant | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.95 | 0.8 |

Tableau 34: Paramètres de la simulation de l'occupation : Taux de présence journalière d'une semaine

Les taux de présence journalière de la catégorie Bureaux sont issus de l'outil SmartE. Afin de diversifier les cycles d'activité, nous ajoutons 4 cycles différents pour les autres catégories, avec des valeurs à dire d'expert.

Taux de présence mensuelle (Pr_m) (un taux pour chaque mois de l'année)

| Taux de présence mensuelle (Pr_m) | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Mois | Toute catégorie sauf enseignement | Enseignement |
| Janvier | 0,77 | 0,76 |
| Février | 0,76 | 0,76 |
| Mars | 0,77 | 0,64 |
| Avril | 0,75 | 0,64 |
| Mai | 0,77 | 0,64 |
| Juin | 0,76 | 0,64 |
| Juillet | 0,64 | 0,32 |
| Août | 0,51 | 0,16 |
| Septembre | 0,76 | 0,76 |
| Octobre | 0,78 | 0,76 |
| Novembre | 0,78 | 0,76 |
| Décembre | 0,75 | 0,72 |

Tableau 35: Paramètres de la simulation de l'occupation : Taux de présence mensuelle

- **Ratio d'absence à la pause de midi (Ab_p)**
 - Enseignement et restaurant : 90%
 - Autres catégories : 80%

Prenons l'exemple d'un bâtiment de bureaux choisi aléatoirement :

Information du bâtiment ID: BATIMENT000000240613671

| | | |
|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| Code INSEE commune: 92050 | Catégorie de construction: Bur | Date de construction: 1976 |
| Date de rénovation: 2010 | Surface chauffée - tertiaire: 6041 | Energie de chauffage: Électricité |
| Système de chauffage: elec_convектор | Présence de climatisation: Oui | Système de climatisation: AC_air_air |
| Présence de cuisine: Non | Présence de datacenter: Oui | |
| Puissance chauffage max: 221000 | Puissance climatisation max: 117550 | |
| Température de consigne chauffage: 21 | Température de consigne climatisation: 25 | |
| Nombre d'emplois: 266 | | |

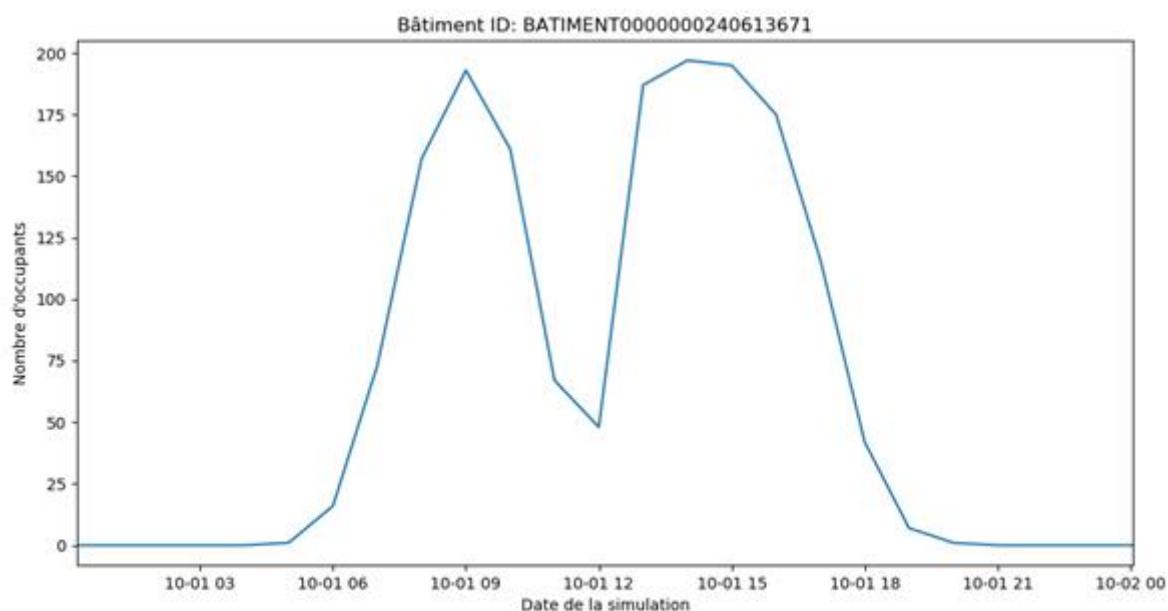


Figure 38: Exemple d'une courbe d'occupation journalière dans un bâtiment de bureaux

Notons que l'amplitude ne correspond pas au nombre d'emplois car les ratios journalier et mensuel sont déjà appliqués.

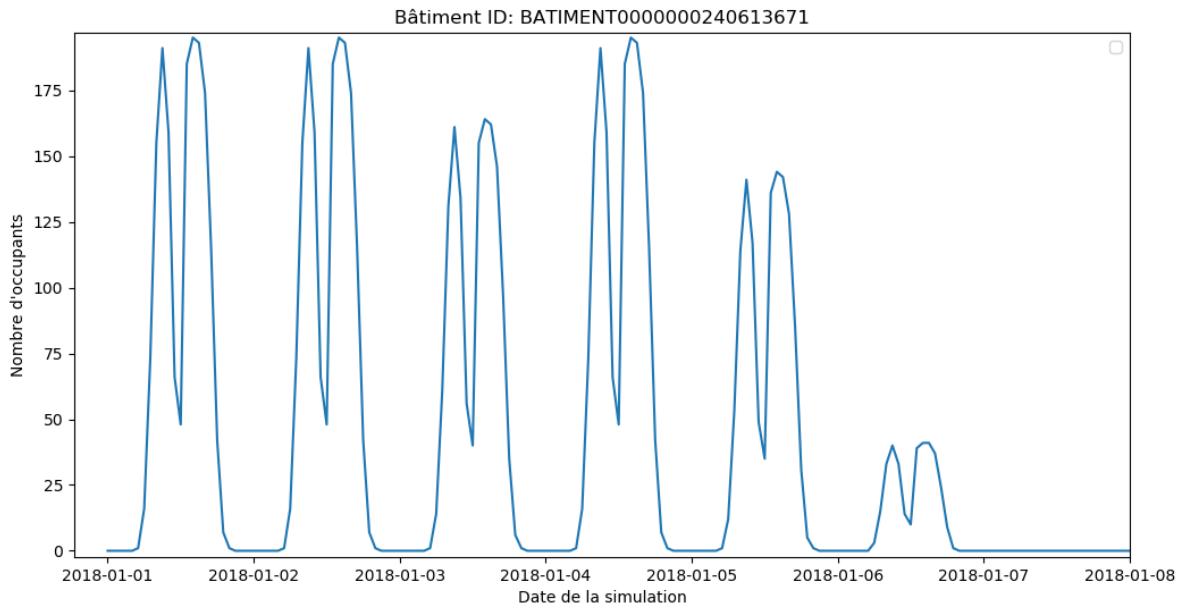


Figure 39: Exemple d'une courbe d'occupation hebdomadaire dans un bâtiment de bureaux

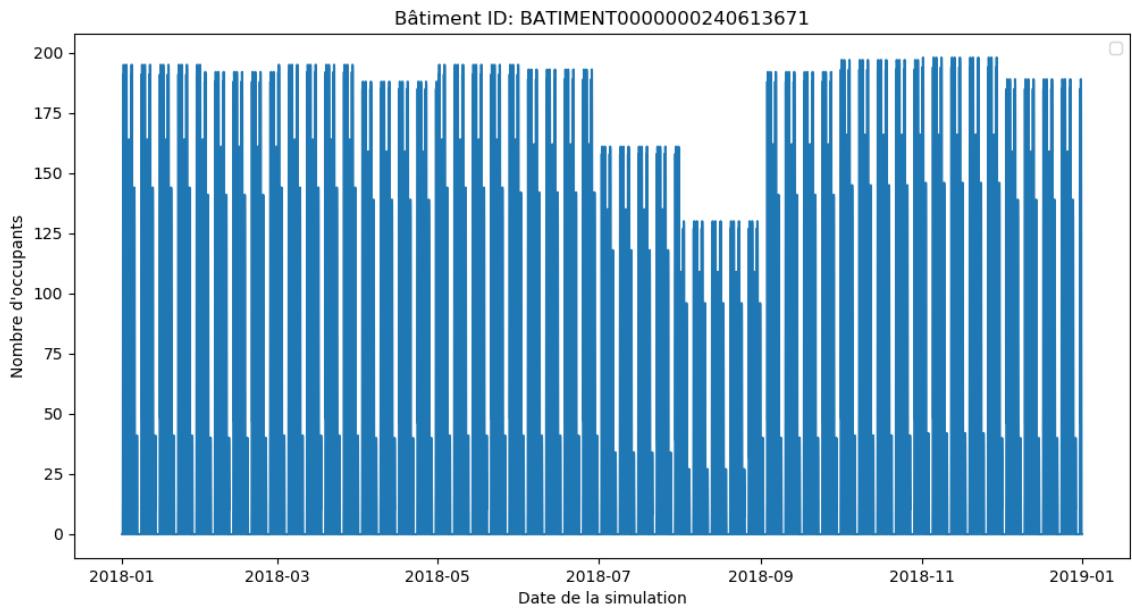


Figure 40: Exemple d'une courbe d'occupation annuelle dans un bâtiment de bureaux

Afin de comptabiliser également les occupants qui ne sont pas des employés, nous ajoutons un flux d'usagers dans la simulation. Ce flux est représenté par une occupation équivalente à chaque pas de temps. Par exemple, si deux usagers entrent dans un magasin et y restent 30 minutes, il suffit de représenter les apports thermiques par un seul usager au pas de temps d'une heure.

Pour la plupart des catégories de construction, nous supposons que le nombre d'usagers est proportionnel au nombre d'emplois dans chaque bâtiment. Cette occupation est décrite par un nombre d'usagers/h/emploi ($N_{\text{usagers}/h/\text{emploi}}$) selon chaque catégorie de construction donné dans le tableau 34 :

| Catégorie de construction | Usagers/h/emploi |
|---|------------------|
| Artisanat | 1 |
| Commerces | 5 |
| Enseignement | 1 |
| Hébergement | 4 |
| Loisirs | 4 |
| Santé | 1 |
| Transport | 5 |
| Bureaux, Entrepôts, Mixte et Spécifique | 0 |

Tableau 36: Nombre d'usagers par heure et par emploi

D'autres variables permettent d'estimer la clientèle. La surface reflète la capacité d'accueil du bâtiment et certaines informations sur la relation entre surface et nombre de clients maximal sont disponibles pour les restaurants. La surface par couvert ($S_{\text{par couvert}}$) d'un restaurant serait entre 2,2 m² et 3 m² selon le niveau de service (source : [61]). On peut donc en déduire le nombre de clients maximal à partir de la surface (dans ce cas on utilise la surface utile).

$S_{\text{par couvert}}$ est choisie aléatoirement entre 2.2 ; 2.4; 2.6; 2.8; 3 selon les probabilités posées à dire d'expert suivantes 40% ; 20% ; 20% ; 10% ; 10%.

Nous pouvons donc calculer le nombre d'occupants maximal ($N_{\text{occupants}}$) avant l'application des taux de présence, comme suit :

- Pour toute catégorie sauf les restaurants : $N_{\text{occupants}} = N_{\text{usagers/h/emploi}} \times N_{\text{emplois}}$
- Pour les restaurants : $N_{\text{occupants}} = N_{\text{emplois}} + SU / S_{\text{par couvert}}$

Il est très difficile de modéliser l'occupation temporaire par des personnes qui ne sont pas des employés du bâtiment (ou de la zone), tels que clients, prestataires, partenaires. Car les pratiques peuvent être très différentes selon l'activité économique, le ciblage de clients, la période et la culture locale (zone géographique). Il faut encore beaucoup d'études de l'occupation pour permettre de bien la paramétriser.

Calcul des charges internes :

Nous supposons que les occupants des bâtiments du secteur tertiaire dégagent en moyenne 100 W par occupant, qui correspond à une activité physique légère (source : [62]). En plus des charges internes des occupants, nous ajoutons celles générées par les usages énergétiques (voir formule ci-dessous), tels que : les datacenters, la cuisson, l'éclairage et les autres spécifiques. En absence de données sur le stockage d'ECS, nous décidons de ne pas prendre en compte les charges internes de cet usage.

$$\text{Charges internes (t)} = 100 \times N_{\text{occupants}}(t) + 0.6 \times P_{\text{autres spécifiques}}(t) + 0.7 \times P_{\text{datacenter}}(t) + P_{\text{cuisson}}(t) + P_{\text{éclairage}}(t)$$

Les facteurs 0.6 et 0.7 représentent respectivement les pertes d'énergie par l'effet Joule des équipements des autres usages spécifiques et des datacenters (selon les dires d'expert).

Variation des consignes :

La simulation de l'occupation nous permet aussi de faire varier les consignes des usages. Certaines consignes sont strictement corrélées au nombre d'occupants à l'instant t, telles que l'éclairage et la cuisson. Tandis que les consignes de chauffage, de climatisation et de ventilation ne varient pas lorsqu'il y a au moins un occupant. Quand le chauffage est en fonctionnement, lorsqu'il n'y a aucun occupant dans le bâtiment, la consigne de chauffage est abaissée à 16°C. De la même manière, la consigne de climatisation est augmentée à 30°C en inoccupation (source : [62]). Les autres usages spécifiques ont la particularité

d'avoir une partie corrélée à l'occupation, et une partie constante (voir Tableau 31). Les consignes d'éclairage et de ventilation sont remises à zéro en dehors des horaires de travail.

IV. Résultats, comparaisons et analyse de sensibilité

Dans cette partie, les résultats de notre approche sont analysés et confrontés à différentes sources de données, afin de valider la méthodologie et d'évaluer dans la mesure du possible la justesse du corps d'hypothèses.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats de la reconstitution du parc (surfaces) et des caractéristiques des bâtiments.

Dans un deuxième temps, nous tentons d'apprécier la pertinence des résultats de simulation énergétique, en les confrontant aux sources de données locales.

Finalement, nous initions une analyse de sensibilité des résultats. La méthodologie développée repose sur un grand nombre de données et hypothèses de natures variées (bases de données économiques, géographiques, performances thermiques, ...). Son exploitation opérationnelle aboutit elle-même à la production d'un grand nombre de données. Il n'est pas envisageable de conduire une véritable analyse de sensibilité sur l'ensemble de ces paramètres mais le choix a été fait de focaliser l'analyse de sensibilité sur deux grandeurs centrales :

- La surface du parc de bâtiments, dont nous évaluons la sensibilité à l'hypothèse « nombre d'emplois » appliquée aux données SIRENE.
- La consommation d'énergie simulée, dont nous observerons la sensibilité aux hypothèses de météorologie.

Les données détaillées concernant le secteur tertiaire sont extrêmement rares, ce qui d'ailleurs contribue à justifier les présents travaux. Le manque de données détaillées limite notre faculté à procéder à une validation des résultats à la maille la plus fine. De ce fait, l'ensemble des comparaisons avec des sources alternatives suppose l'agrégation à d'autres périmètres des données détaillées produites selon notre méthode (régional, départemental, communal, par secteur d'activité, ...).

1. Résultats concernant la description du parc

1.1. Quelques illustrations des résultats : description des surfaces

Dans cette partie, nous présentons quelques résultats concernant la méthode de reconstitution. Les processus que nous avons définis permettent d'établir le parc tertiaire pour chaque commune en France métropolitaine. Grâce à la représentation du parc reconstitué, nous pouvons obtenir, pour chaque commune, une synthèse des surfaces dédiées aux activités de type tertiaire qui permettent de montrer les singularités du parc communal.

Prenons l'exemple des trois communes de Nanterre, Courbevoie et Puteaux qui partagent La Défense ; c'est un quartier d'affaires qui est caractérisé par des immeubles de grande hauteur, où se trouvent les sièges sociaux de grands groupes nationaux et internationaux. Le secteur des bureaux est donc le plus présent sur ce quartier. La Figure 41 montre la répartition territoriale des immeubles tertiaires sur chacune de ces trois communes et illustre l'extrême concentration des immeubles de grande hauteur sur le territoire de La Défense.

Carte des bâtiments abritant des activités du secteur tertiaire

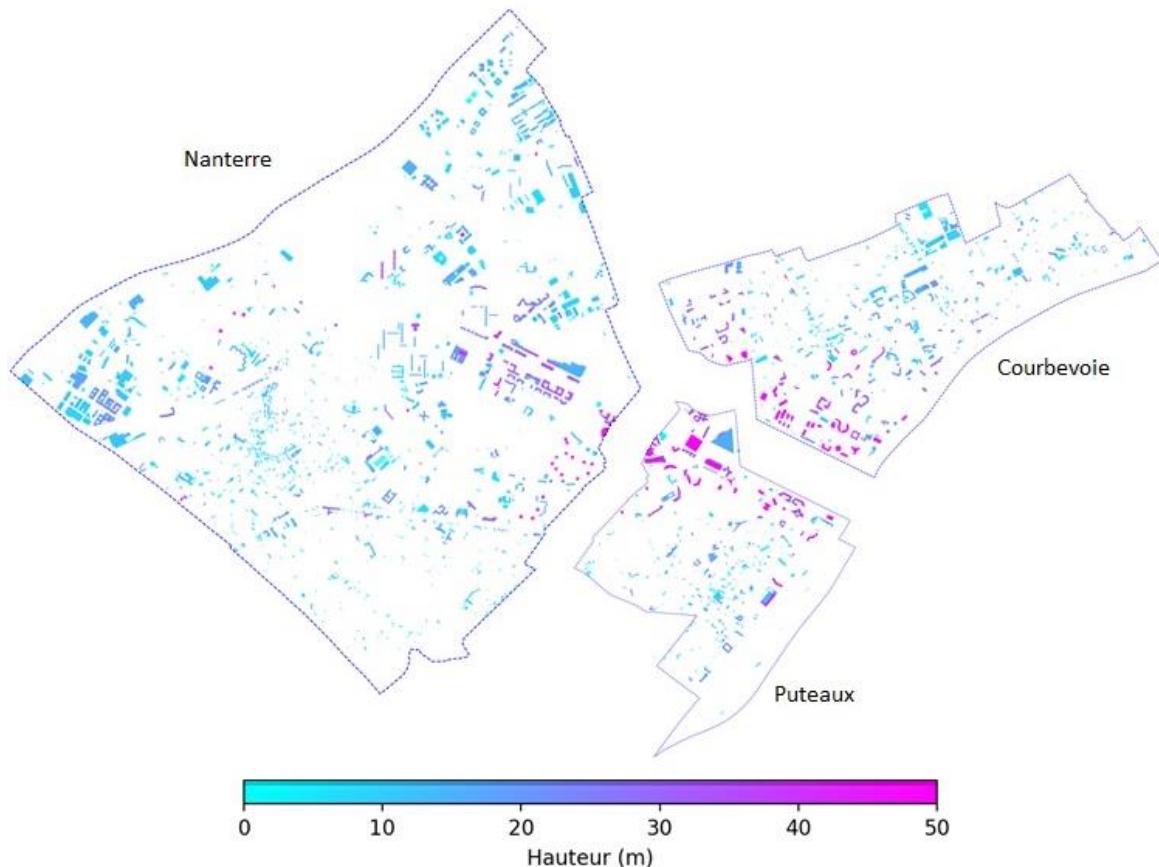


Figure 41: Carte des parcs communaux de Nanterre, de Courbevoie et de Puteaux

Sur cette carte, nous pouvons identifier le quartier de la Défense à la frontière entre les trois communes, où se regroupent les bâtiments de grande taille. La construction de ce quartier a démarré au début des années 60 suite à la création en 1958 de l'EPAD (Établissement public pour l'aménagement de la région de la Défense). La Défense a connu une accélération importante de croissance à partir de 1966 avec la livraison de la première tour jusqu'à la crise économique en 1973 due au choc pétrolier. Pendant la crise, plusieurs espaces de bureaux ont été laissé vides jusqu'au début des années 80, quand la demande de surface a recommencé à être forte. Ce n'est qu'à partir de cette période que la construction de ce quartier d'affaires a repris un certain dynamisme.

L'application de la méthode permet une caractérisation fine du parc tertiaire à l'échelle communale. Il est donc possible d'établir pour chacune des trois communes une sorte de « Portrait synthétique du parc tertiaire » qui permet d'en saisir les caractéristiques essentielles (voir Figure 42, Figure 43 et Figure 44). C'est une sortie automatisée que nous avons formatée.

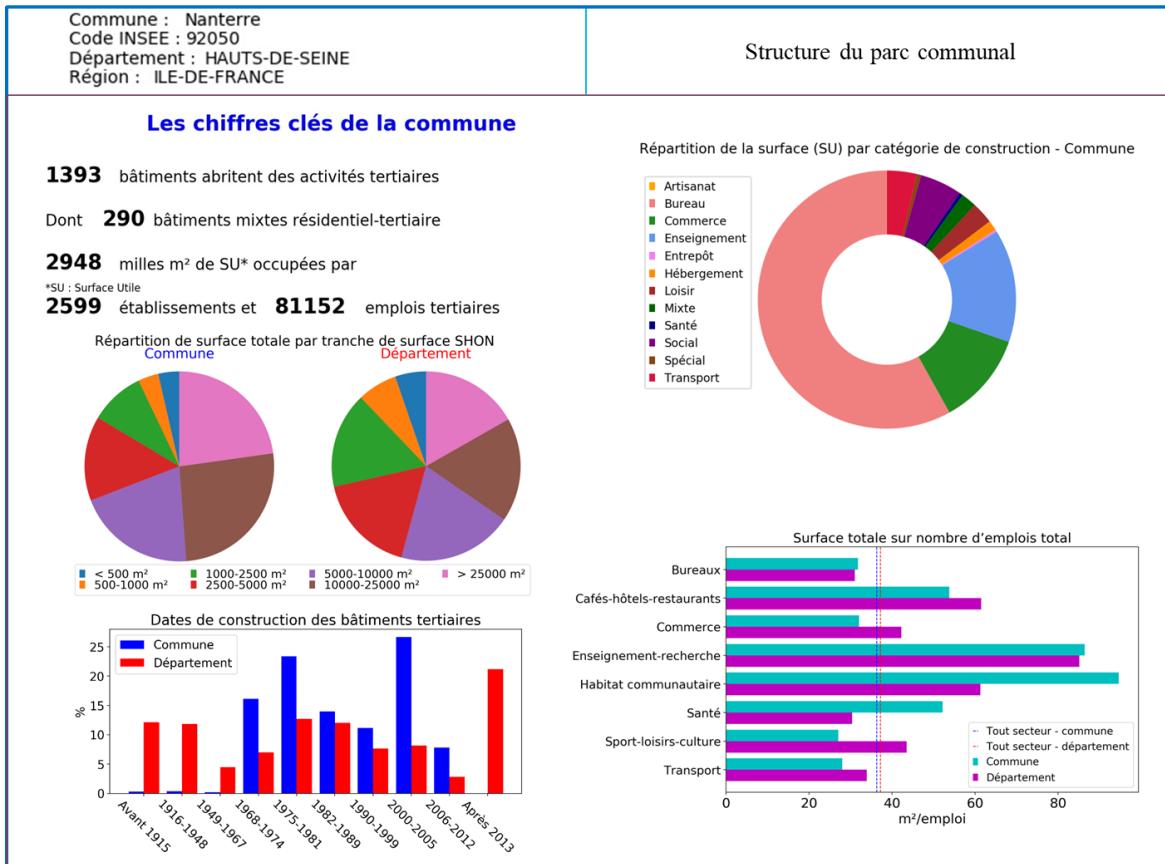


Figure 42: Structure du parc tertiaire de Nanterre

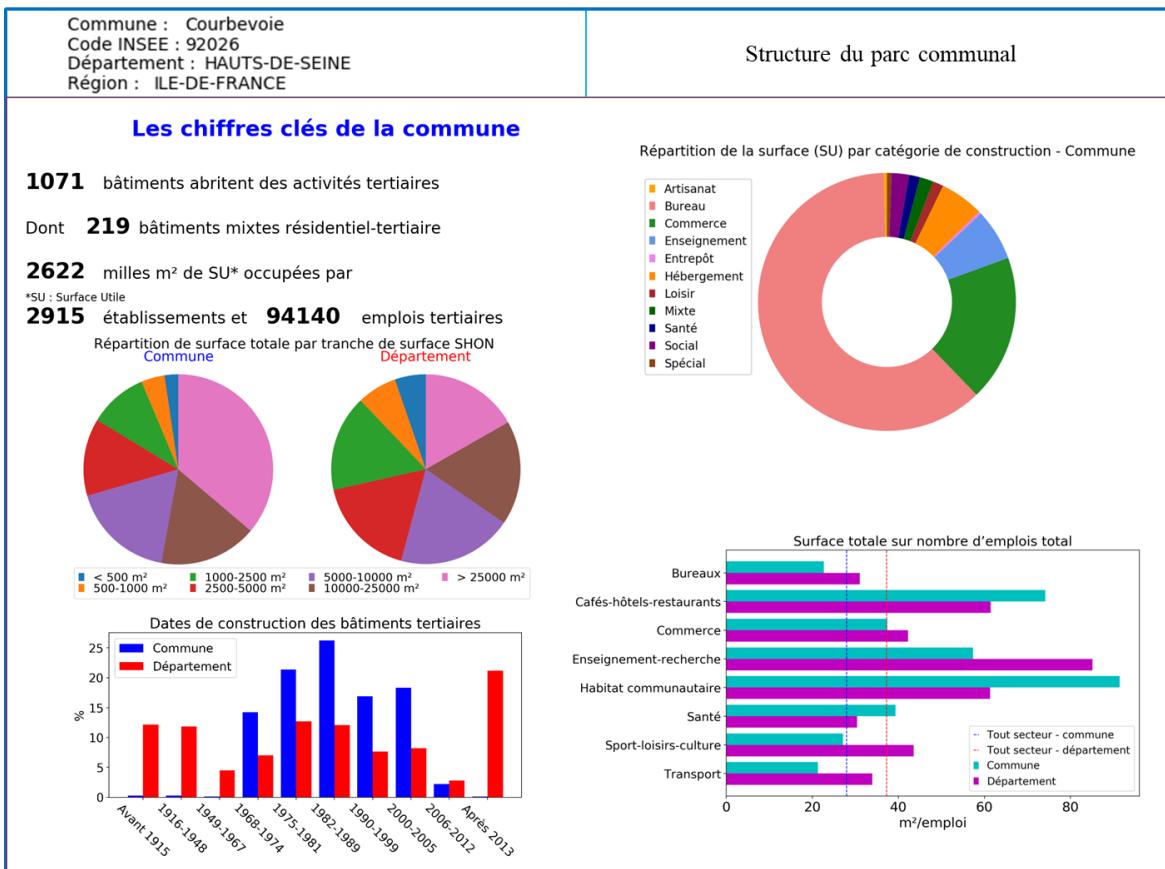


Figure 43: Structure du parc tertiaire de Courbevoie

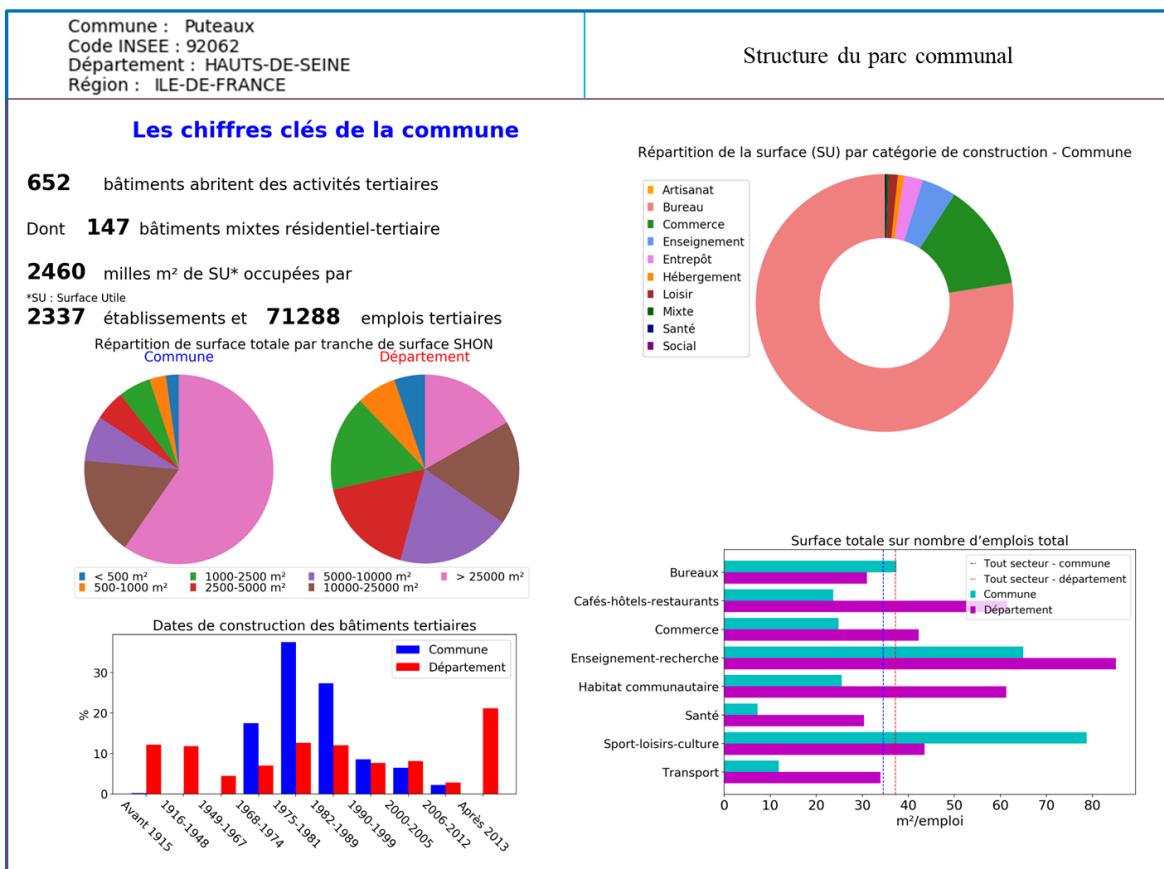


Figure 44: Structure du parc tertiaire de Puteaux

En superficie, les communes de Puteaux et de Courbevoie sont plus petites que Nanterre, mais elles accueillent plus d'immeubles de grande hauteur sur leurs territoires. Les fiches ci-dessus reflètent bien cette situation par les proportions écrasantes de la tranche de surface la plus grande et de la catégorie « Bureaux ».

En synthétisant les caractéristiques propres des parcs de chacune de ces trois communes, toutes liées à La Défense, ces résultats montrent l'intérêt d'une méthode de reconstitution du parc de bâtiment basée sur la réconciliation au niveau le plus fin de différentes sources de données.

Afin de décrire les échelles plus grandes que celle de la commune (départementale, régionale et nationale), il suffit de reconstituer, puis regrouper l'ensemble des parcs communaux inclus dans le département, la région ou bien la France métropolitaine. Pour illustrer cela, nous appliquons notre méthode à la région Île-de-France, cela permettra aussi de comparer nos résultats aux sources externes (dans la partie suivante). La région Île-de-France est retenue pour trois raisons principales :

- Le parc tertiaire francilien représente plus de 20% du parc tertiaire national (source : données CEREN 2016).
- Le poids du secteur tertiaire dans l'économie francilienne est particulièrement important et dépasse de loin la moyenne nationale (87% de l'emploi salarié contre 80% d'après l'INSEE [63])
- Le parc Tertiaire et sa consommation d'énergie sont plutôt mieux documentés en Île-de-France que dans d'autres régions, ce qui autorise la comparaison de nos résultats avec certaines données publiées.

La carte ci-dessous montre la répartition de la surface utile du parc francilien par commune. Notons que l'utilisation du logarithme de base 2 permet de mieux afficher les valeurs extrêmes sur la même carte.

Répartition de la surface utile du secteur tertiaire par commune dans l'Île-de-France

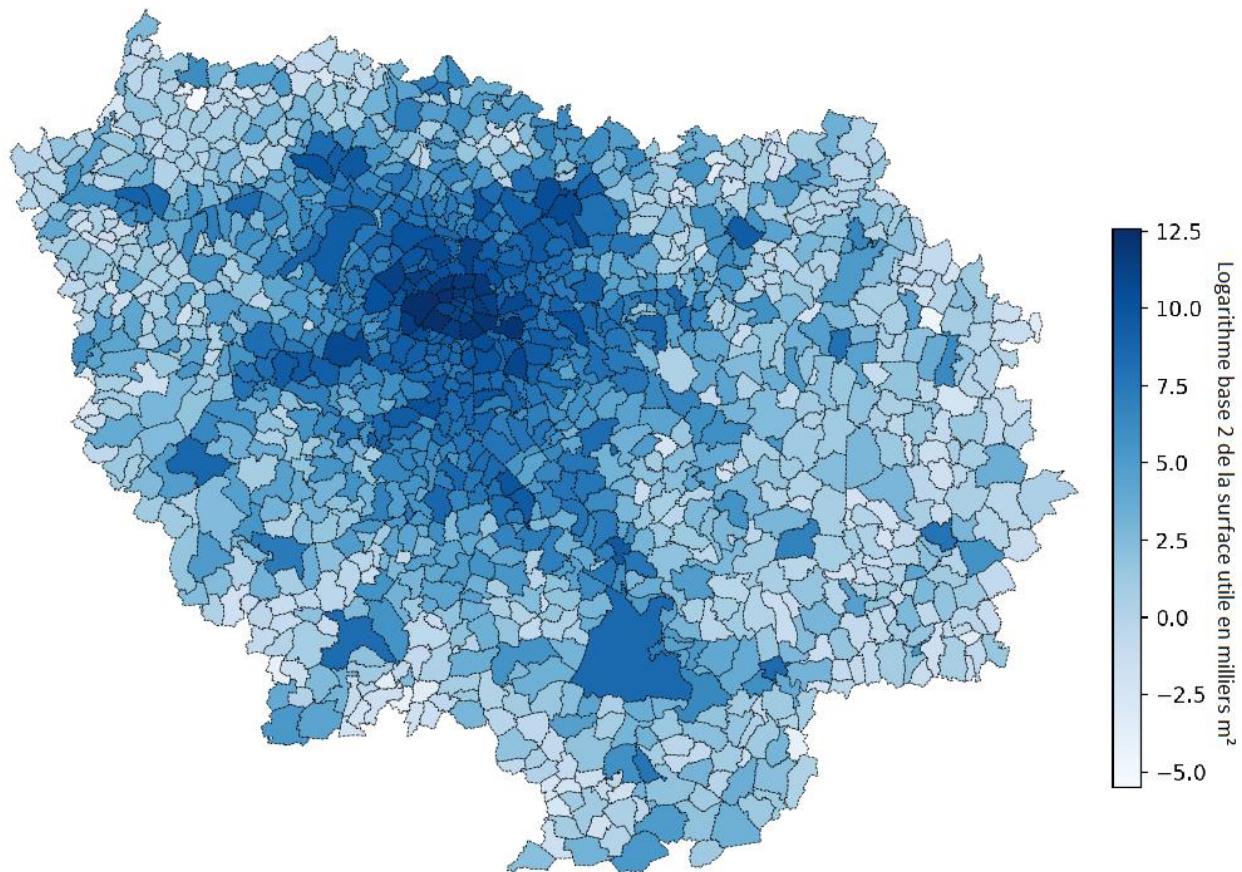
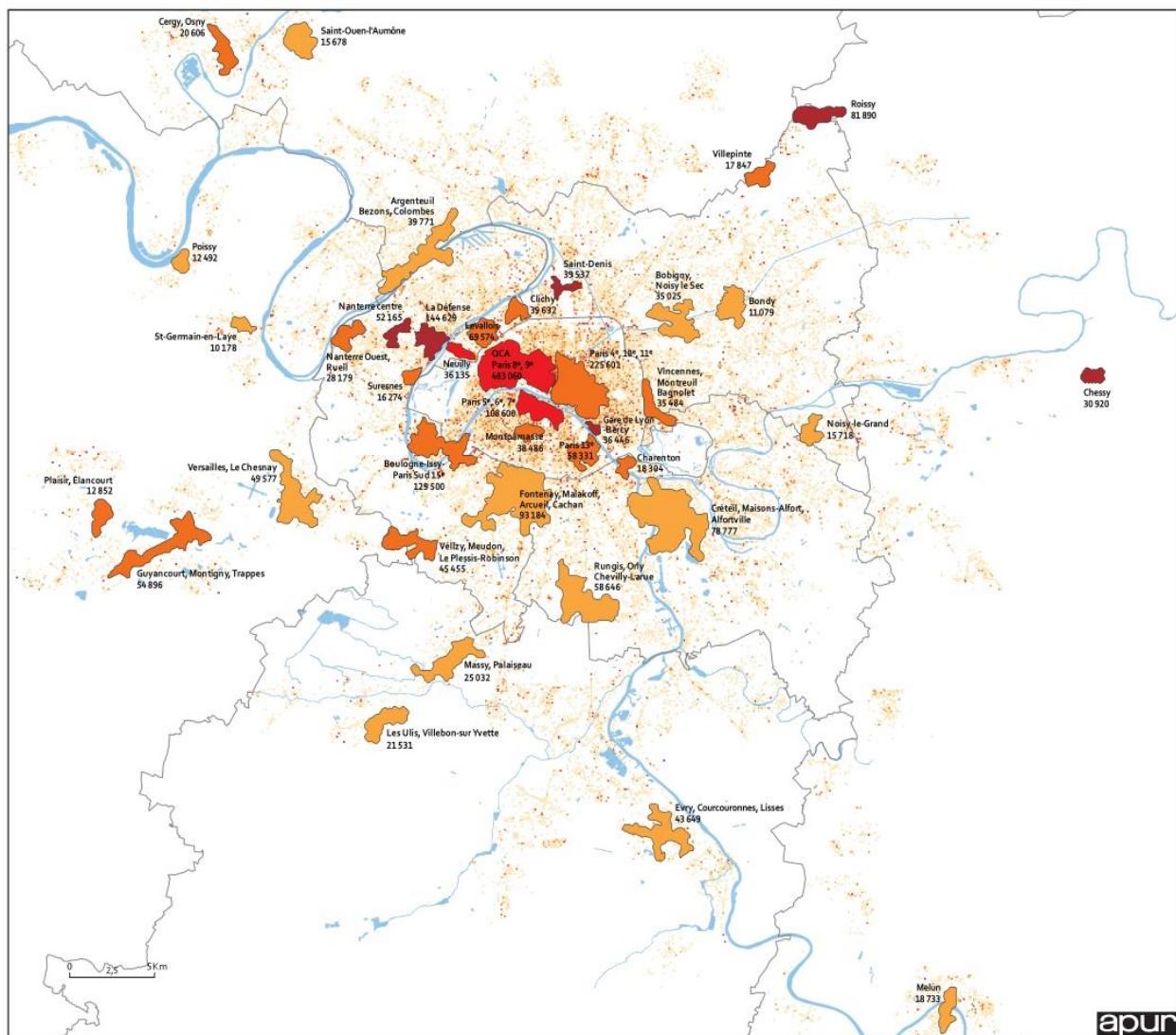


Figure 45: Répartition de la surface utile du parc tertiaire francilien

Nous pouvons distinguer clairement la zone d'activités avec la plus forte concentration dans la région, qui est sans surprise Paris, surtout vers l'ouest de la ville où se trouve le quartier central des affaires (QCA), situé dans les 2^e, 8^e, 9^e, 16^e et 17^e arrondissements, et le quartier de La Défense dans la continuité. Ces quartiers d'affaires représentent la zone d'activités la plus importante en France, et se caractérisent par une proportion dominante du secteur des bureaux. L'APUR [64] décrit l'importance de cette zone comme suit :

« Ces pôles concentrent une majorité d'emplois tertiaires qualifiés dont un sur deux est un emploi de cadre (57 %). Le QCA est, de loin, le pôle d'emploi français et régional le plus important. Avec près de 500 000 emplois salariés, il représente à lui seul près de 30 % des emplois salariés de Paris et près de 10 % des emplois salariés franciliens. La finance et l'assurance, ainsi que les activités de support et de conseil, sont des secteurs bien représentés (respectivement 16 % et 15 % des emplois du pôle). Ce quartier, vitrine de Paris, comporte également de nombreux commerces (grands magasins), hôtels, palaces et restaurants. Par ailleurs, l'administration y est également implantée (ministères, Cour des Comptes). Ce pôle mixte en termes d'activités compte 39 % de cadres et 34 % d'employés. Le quartier de La Défense est le pôle francilien le plus important hors de Paris (144 600 emplois). Au fil des années, il est devenu l'extension du QCA vers l'ouest, mais sa composition sectorielle est différente : beaucoup de sièges sociaux localisés à Paris ont décidé de s'installer à La Défense au cours des années 1990. » La répartition du parc francilien que nous reconstituons à la maille communale se rapproche de la densité d'emplois établie par l'APUR (voir Figure 46). Ces emplois se trouvent dans des bâtiments divers des plus modernes aux plus anciens.

Forte densité d'emploi dans les pôles de La Défense, Nanterre, Saint-Denis et Roissy



Densité emploi / ha



Source : INSEE 2010

Figure 46: Densité d'emploi en Île-de-France (source : APUR)

Les résultats de la reconstitution du parc tertiaire francilien selon notre méthode permettent de décrire le parc via les synthèses (graphiques) des caractéristiques de chacun des bâtiments reconstitués. A l'heure actuelle, il existe très peu de données comparables au même périmètre, y compris dans SITADEL à cause de la date limite basse de 1975. De ce fait, nous avons comparé nos résultats aux

autres sources par secteurs d'activité. La Figure 47 montre la structuration du parc par les catégories de construction, où la catégorie « Mixte résidentiel-tertiaire » est ajoutée par nos travaux.

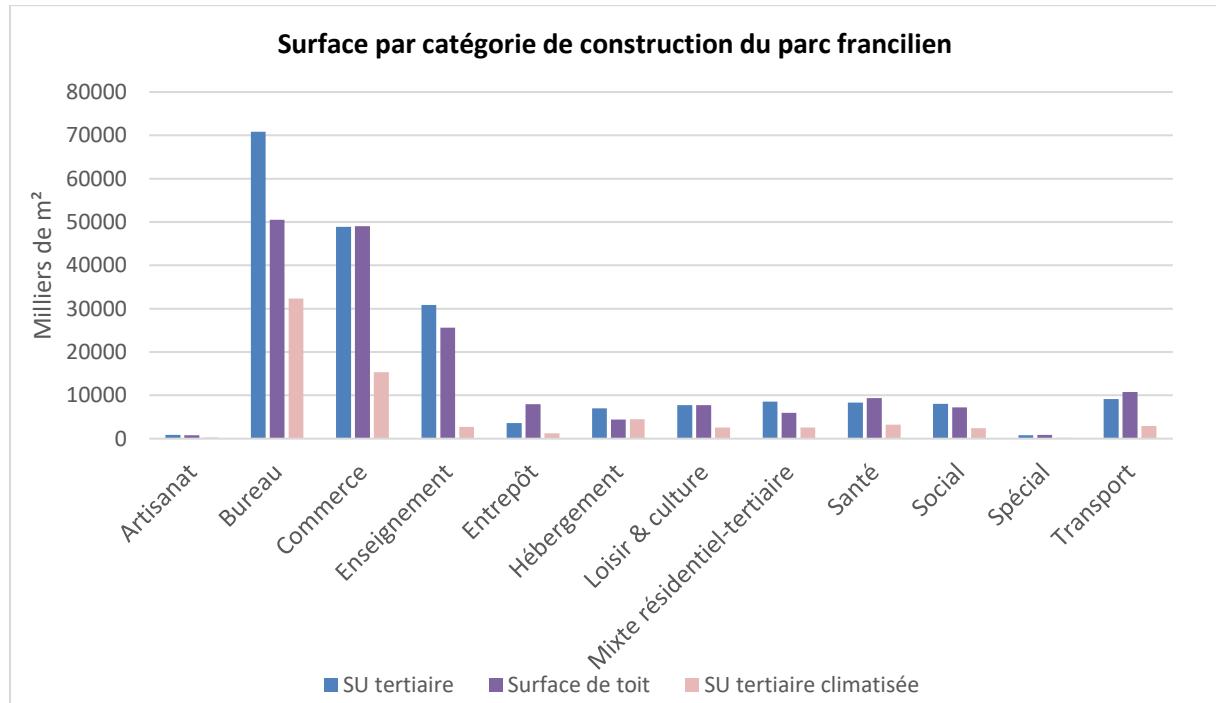


Figure 47: Surface par catégorie de construction du parc francilien

La classification par catégorie de construction permet aussi de distinguer et d'en caractériser certaines qui ne figurent pas dans la classification par secteur d'activité, par exemple : les entrepôts qui sont souvent dissous dans les secteurs commerce et transport, ou les bâtiments sociaux qui sont partagés dans les secteurs hébergement et santé. La nomenclature du CEREN répond à une double logique sectorielle et énergétique, celle de SITADEL a pour but de décrire l'usage au moment du permis de construire.

L'application de la méthode permet en outre d'enrichir notre compréhension des caractéristiques générales du parc en produisant différentes synthèses généralement inaccessibles. La Figure 48 permet par exemple d'illustrer *via* le rapport entre la surface SHON et la surface de toiture la plus grande proportion de bâtiments de grande hauteur dans la ville de Paris (75) et le département des Hauts-de-Seine (92) que dans les autres départements d'Ile de France.

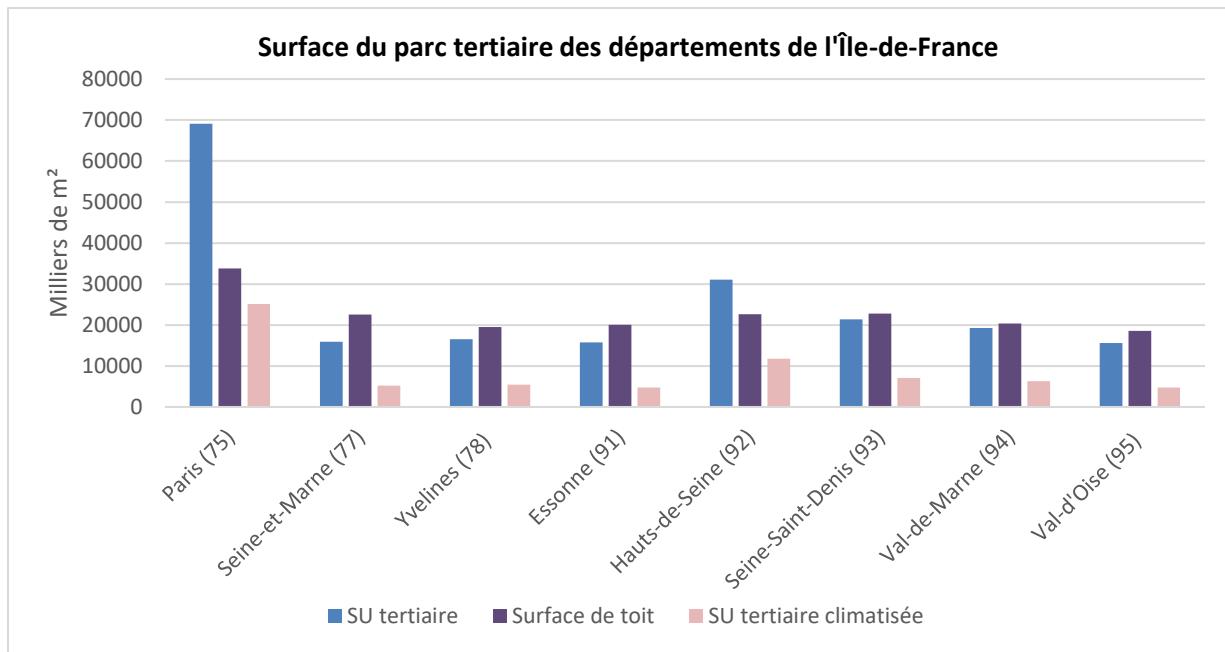


Figure 48: Description des surfaces des départements de l'Île-de-France

Cette représentation nous permet de mieux caractériser les spécificités liées à un type d'activité, à une catégorie de construction, ou bien à une zone géographique. Notons que la surface du toit est plus élevée que la SU dans le cas où le bâtiment a un nombre de niveaux peu élevé et un toit en pente. Ces surfaces sont choisies pour montrer la différence entre catégories (Figure 47) et entre départements (Figure 48), par exemple : les catégories bureaux, enseignement et hébergement ont une surface de toit bien inférieure à la SU, ce qui indique la structure plutôt verticale des bâtiments (nombre d'étages élevé avec toit plat), au contraire des catégories entrepôt et transport (beaucoup de bâtiments à un niveau avec un en pente). L'analyse des indicateurs Surface Utile, Surface de toit et surface climatisée obtenus par synthèse des caractéristiques des bâtiments à la maille départementale dresse un portrait contrasté du parc de chacun des départements et la singularité de Paris et des Hauts-de-Seine. Cette singularité résulte des différences entre départements (poids des différents types d'activité et notamment des bureaux et commerces), mais vraisemblablement aussi de différences des caractéristiques des bâtiments entre départements au sein d'un même secteur. La Figure 49 montre d'ailleurs les conséquences d'une certaine spécialisation fonctionnelle des territoires sur la répartition territoriale du parc en fonction de la catégorie de construction.

Répartition de la surface utile du secteur tertiaire par commune dans l'Île-de-France

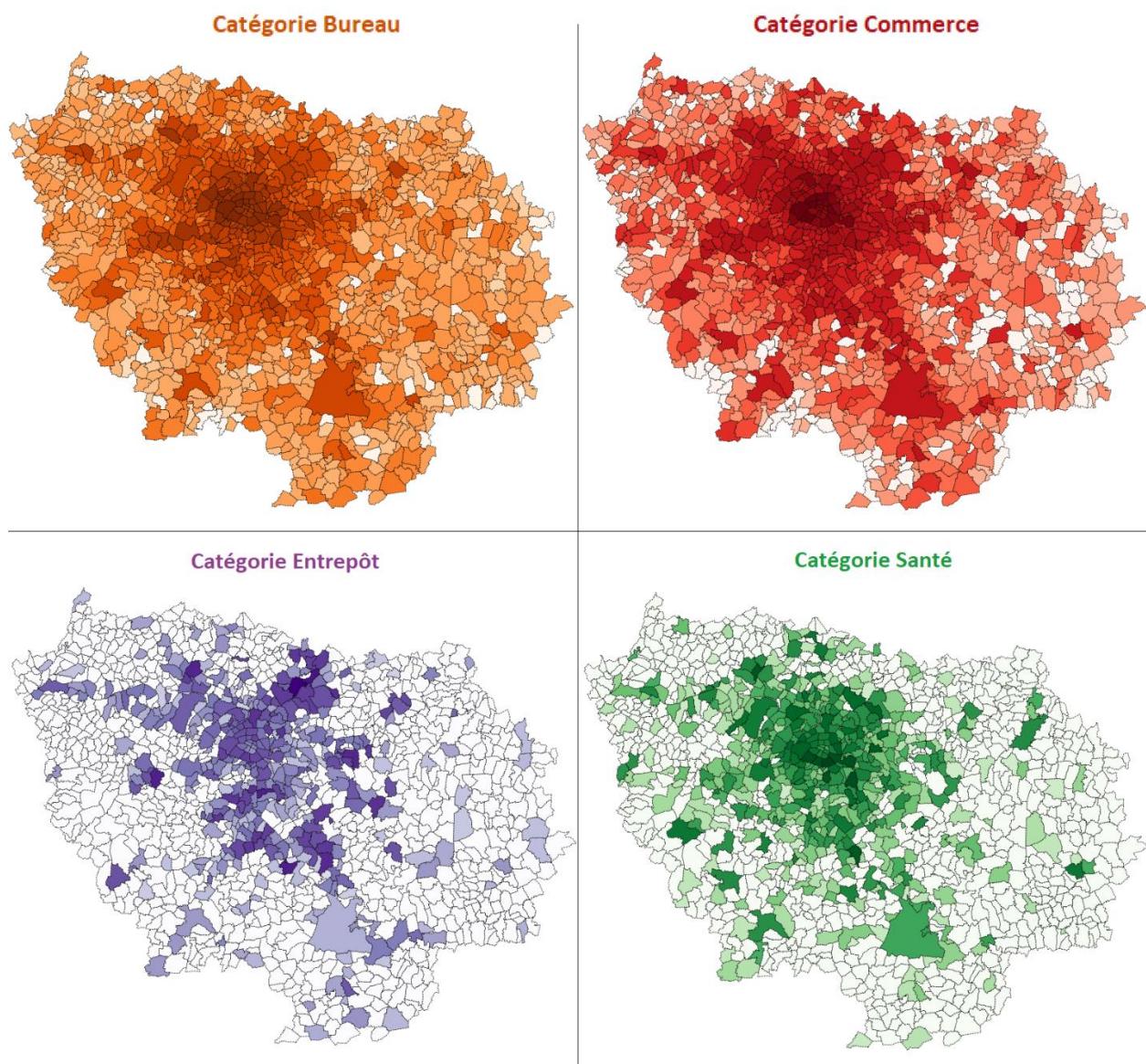


Figure 49: Répartition de la surface utile du parc tertiaire francilien - Catégories Bureau, Commerce, Entrepôt et Santé

Le parc francilien est composé d'une majorité de bâtiments anciens (illustration en Figure 50). Néanmoins, cette distribution est aussi très variable selon la zone géographique, par exemple : Paris est connu pour ses nombreux bâtiments historiques, alors que la Défense est un quartier neuf.

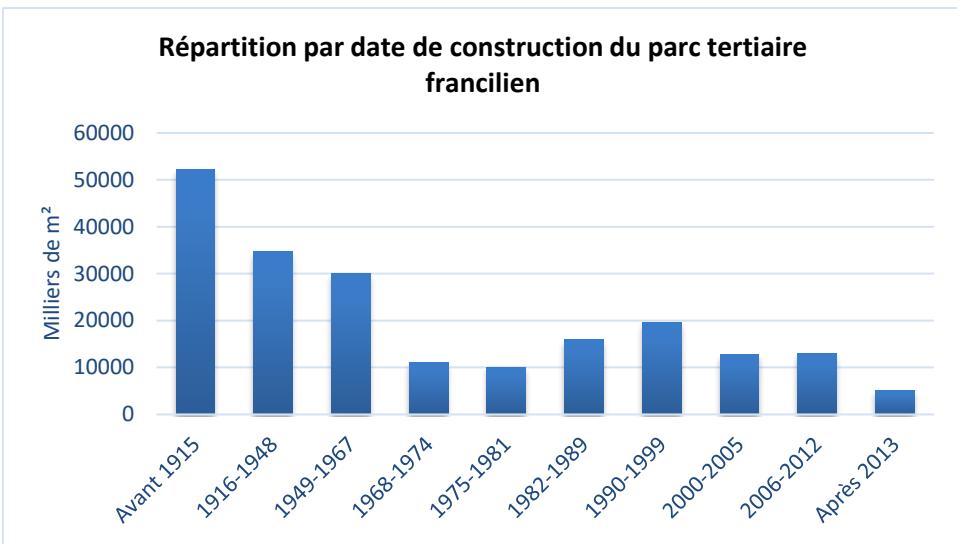


Figure 50: Répartition par date de construction du parc tertiaire francilien

Les surfaces occupées par les activités tertiaires dans l'Île-de-France sont pour la plupart situées dans les bâtiments de taille moyenne et grande (voir Figure 51) : les bâtiments d'une surface SHON supérieure à 2500 m² représentent près des deux-tiers de la surface totale. La taille des bâtiments est aussi très variable selon l'aménagement urbain et la densité d'emplois. Par exemple : La Défense a été aménagée pour accueillir une quantité importante d'immeubles de grande hauteur.

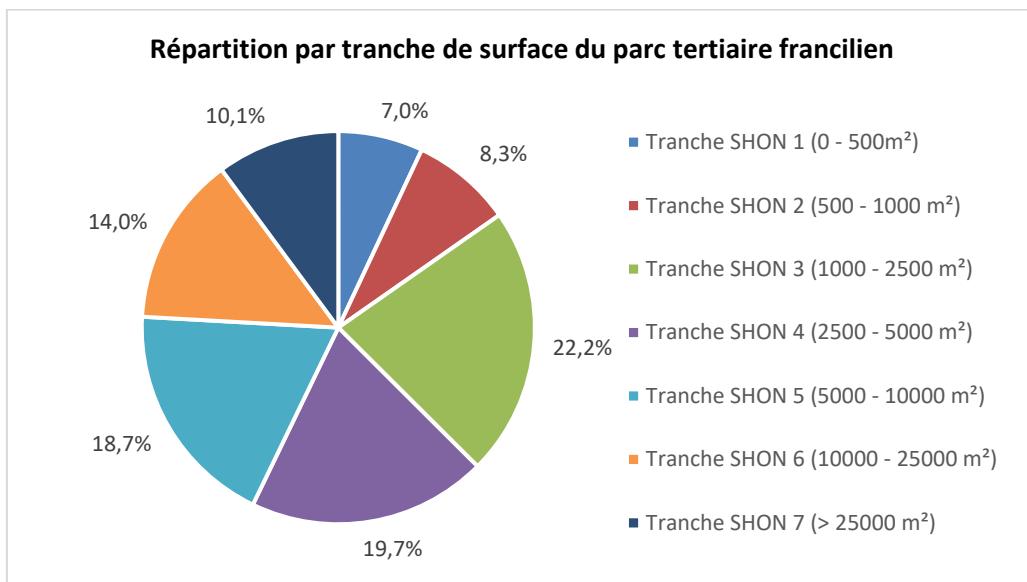


Figure 51: Répartition par tranche de surface du parc tertiaire francilien

Dans ce qui suit, nous observons les caractéristiques du parc tertiaire dans Paris et le comparons à celles du parc francilien. Le regroupement des surfaces des bâtiments par catégorie de construction nous montre le poids de chaque composant du parc. Nous remarquons qu'en répartition de la surface utile, la structure du parc parisien est très proche de celle du parc régional (voir Figure 47). Néanmoins, le rapport entre la SU et la surface de toit dans Paris est nettement différent de son homologue à la maille régionale (surtout concernant les catégories Commerce et Enseignement).

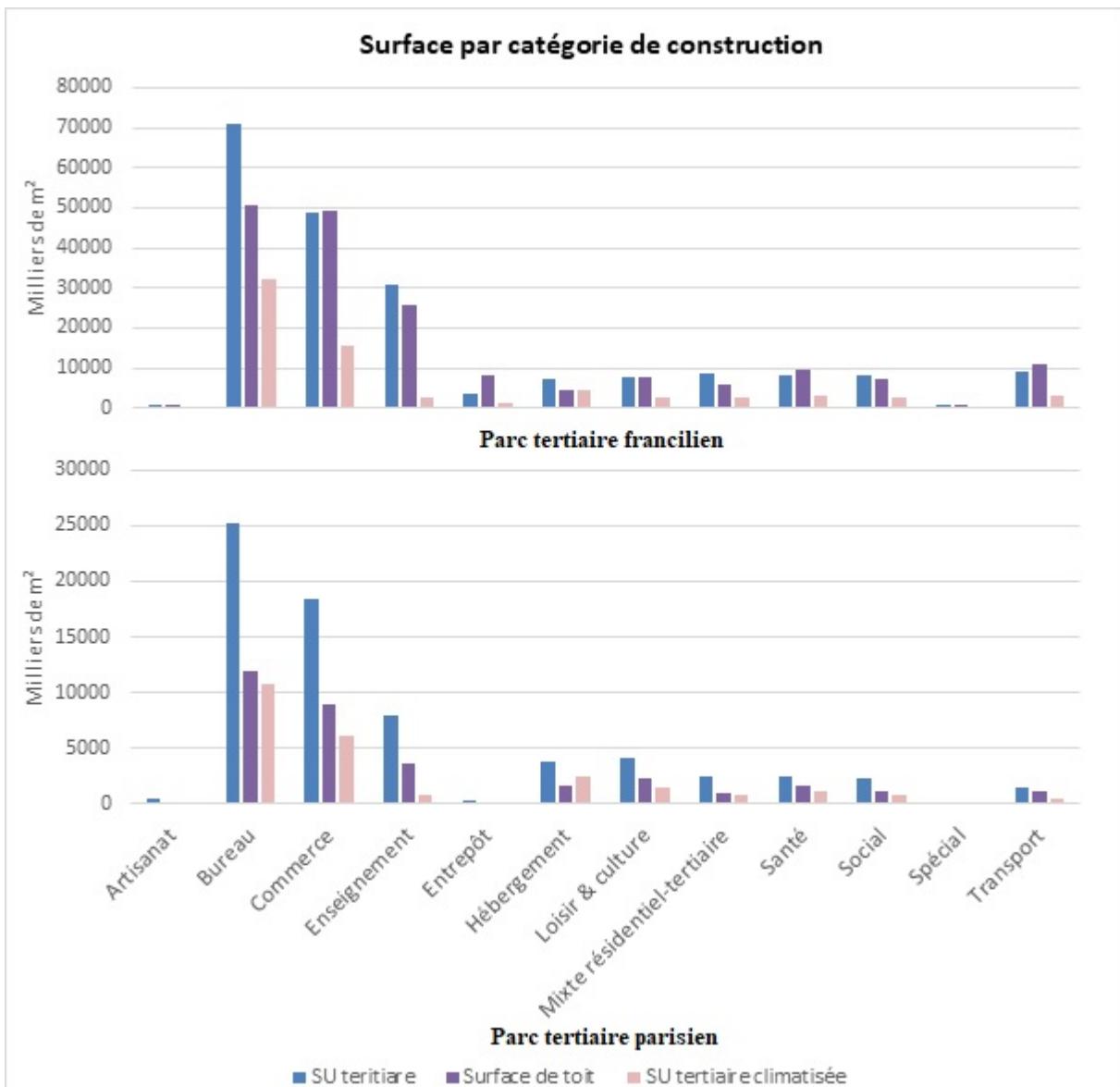


Figure 52: Répartition en catégorie de construction de la surface du parc tertiaire de Paris

La répartition du parc parisien par date de construction se distingue clairement de celle du parc régional (voir Figure 50). Nous pouvons constater que la part du parc ancien (construite avant 1975) dans le parc total est très largement majoritaire et de loin supérieure à celle du parc ancien dans le parc régional.

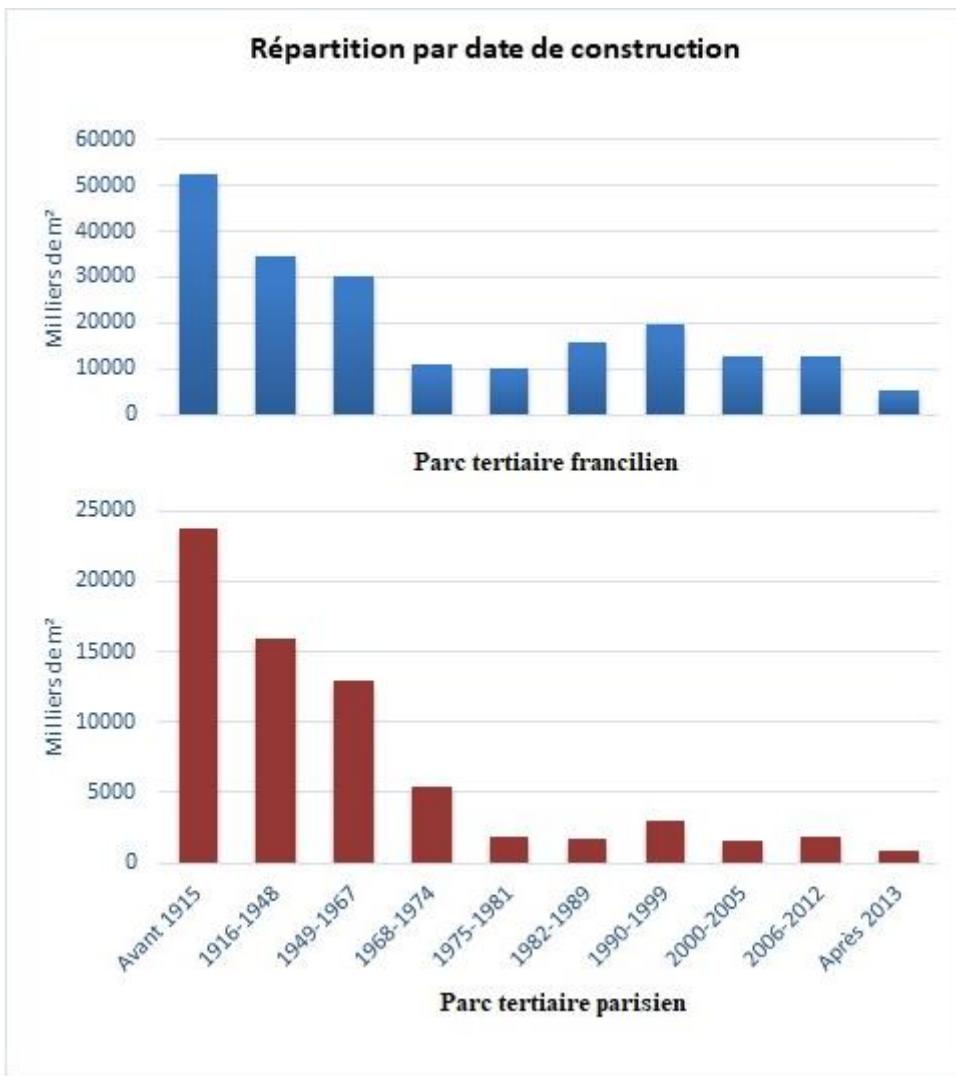


Figure 53: Répartition par date de construction du parc parisien

1.2. Comparaison de notre évaluation des surfaces avec les sources externes

L’Île-de-France joue un rôle économique très important aux échelles nationale et mondiale. Comparée aux grandes métropoles, son poids économique est classé au 6ème niveau mondial (source : IIED [57]), avec 650 milliards d’euros en PIB (selon l’INSEE 2014), après l’aire métropolitaine de Tokyo, le Grand New York, Los Angeles et Osaka. Pourtant, sa population n’est qu’à la 26ème position mondiale avec plus de 11 millions d’habitants (source : worldpopulationreview [58]).

Selon plusieurs sources, la surface totale du parc de l’Île-de-France est estimée à plus de 200 millions de m² de surface utile. Dans la Figure 54, la surface totale du parc estimée par notre méthodologie est comparée à celles du CEREN par secteur d’activité (selon la classification du CEREN), et de la base BâtiStato [65] établie par la DRIEA Île-de-France. Les sources principales permettant d’établir la base BâtiStato sont :

- la base des fichiers fonciers MAJIC (2014), administrée par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFiP),
- le Répertoire des logements locatifs des bailleurs sociaux (RPLS), 2014,

- la modélisation du ROSE¹⁷ (partenaire de l'ADEME Île-de-France), 2016.

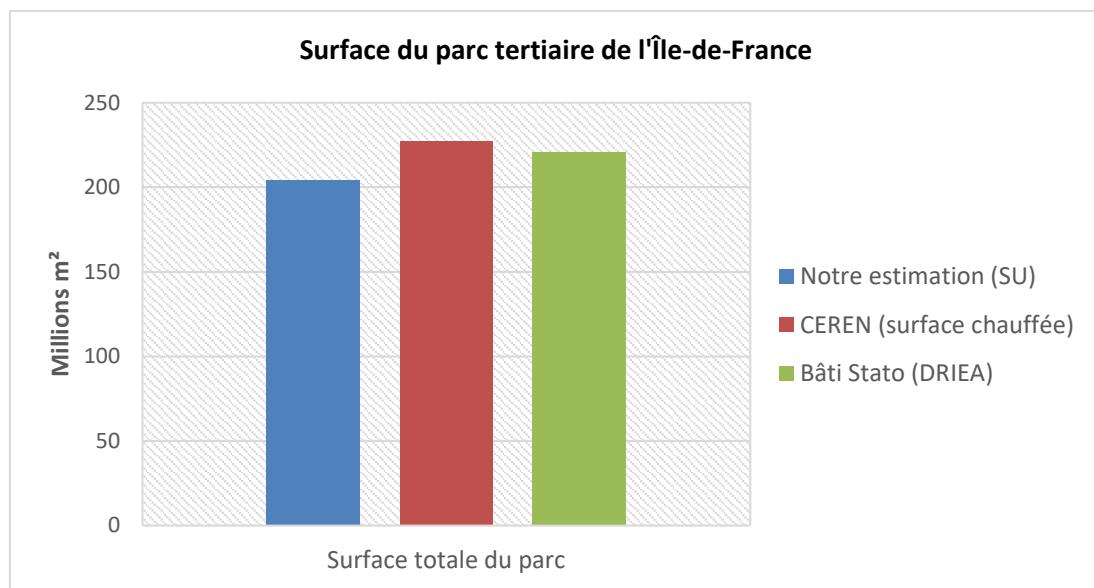


Figure 54: Surface totale du parc de l'Île-de-France

Avec notre méthode, cette valeur est estimée à 205 millions de m² abritant plus de 5 millions d'emplois. Les écarts entre les estimations sont principalement liés aux différentes méthodologies utilisées. Notre estimation de la surface (à l'année de référence 2015) est obtenue par le regroupement de l'ensemble des bâtiments tertiaires identifiés et caractérisés sur le territoire de l'Île-de-France.

Celle du CEREN (2016) est obtenue par la méthode surface par emplois, dont les ratios par secteur d'activité sont établis par enquêtes auprès des établissements tertiaires.

Parallèlement à BâtiStato, la DRIEA Île-de-France a créé une base appelée BâtiSig, qui est le résultat du croisement entre la base MAJIC et la base BDTOPO. Néanmoins, la partie tertiaire de BâtiSig est encore en cours de développement. La DRIEA Île-de-France précise que les données fournies par BâtiStato sont un ordre de grandeur. Dans la version 2.0 de BâtiStato, seule une partie du parc tertiaire est caractérisée (en segments par secteurs d'activité). Une partie du parc est en effet recensée en tant que « Autres tertiaires » et « Inconnu ». Nous extraîrons les données de BâtiStato sur le parc tertiaire francilien (voir Tableau 37) pour comparer à nos résultats pour le secteur tertiaire dans son entier.

Dans le tableau 37, nous trouvons la surface totale du parc (donnée en Figure 54) en regroupant les 3 « types » de tertiaire, ainsi que le nombre de bâtiments estimé par le croisement entre la base MAJIC et la base BDTOPO. Notre estimation n'est pas seulement proche de BâtiStato & BâtiSig en comparaison de surface, mais aussi en nombre de bâtiments (en comptant les bâtiments mixtes). Notre parc reconstitué contient 203 000 individus, contre 231 000 pour la DRIEA. Les différences d'effectifs de bâtiments peuvent provenir de différences dans le traitement des données SIRENE, qui contiennent par exemple les références de sociétés ou associations (exemple : Sociétés Civiles Immobilières), dont l'activité ne suppose pas nécessairement la présence d'emplois et de surfaces dédiées à l'activité. Ces établissements ne sont pas pris en compte dans notre évaluation. Notons que la définition de ce qu'est un bâtiment tertiaire pour la DRIEA est très proche de la nôtre. La DRIEA adopte en effet le parti pris suivant :

« Ensemble architecturalement homogène et dont les différentes parties d'un même propriétaire peuvent être assemblées par leur continuité spatiale ». De plus, « est considéré comme tertiaire, tout bâtiment

¹⁷ ROSE : Réseau d'Observation Statistique de l'Énergie et des émissions de gaz à effet de serre en Île-de-France

qui présente au moins un local tertiaire ». De fait sont affichés, dans les statistiques, les bâtiments « mixtes », qui regroupent des logements et des locaux d'activités tertiaires. »

| Nombre de bâtiments tertiaires | | |
|---------------------------------------|------------|-----------------------------------|
| Type de tertiaire | Total | Indice de cohérence ¹⁸ |
| Tertiaire | 99 125 | 75% |
| Autre tertiaire | 47 993 | - |
| Inconnu | 84 162 | - |
| Surfaces tertiaires (m ²) | | |
| Type de tertiaire | Total | |
| Tertiaire | 91 004 211 | - |
| Autre tertiaire | 51 772 876 | - |
| Inconnu | 77 681 202 | - |

Tableau 37: Statistiques sur le parc tertiaire francilien de Bâtistato (source : DRIEA Île-de-France)

En ce qui concerne le secteur tertiaire, les précautions suivantes sont indiquées par la DRIEA :

- Les définitions des champs sont celles retenues dans les sources de données utilisées.
- Les informations issues des fichiers fonciers relatives aux locaux d'activités sont à prendre avec précaution : les années de construction des locaux et les surfaces ne sont en effet que partiellement renseignées et non systématiquement contrôlées par les services fiscaux. Par ailleurs Bâti Stato rend compte majoritairement du parc privé. Comme le précise le CEREMA, « les données fiscales servent directement ou indirectement au calcul d'impôts. Par conséquent, tout ce qui n'est pas déclaré par le contribuable n'existe pas dans les fichiers fonciers. C'est le cas, en particulier de certains hôpitaux, écoles, etc. ».
- L'information sur le nombre de bâtiments n'est pas directement accessible dans les fichiers fonciers : la donnée a fait l'objet d'un traitement spécifique par la DRIEA via un croisement entre les données des fichiers fonciers et ceux de la BD TOPO et ne constitue qu'un ordre de grandeur.

En résumé, les comparaisons ci-dessus ne sont à prendre qu'en ordre de grandeur.

L'Île-de-France est la région où se trouve l'administration centrale de plusieurs organismes publics et privés, avec de nombreux sièges de groupes nationaux ou internationaux. En conséquence, le secteur des bureaux est la partie la plus importante du parc régional en termes de surface. Grâce à une population de 12 millions d'habitants, les commerces se trouvent en deuxième place, suivis par l'enseignement et la recherche qui regroupent de nombreux établissements académiques franciliens. Dans notre parc reconstitué, la conversion du code APE majoritaire de chaque bâtiment en secteur d'activité correspondant, selon la classification du CEREN, permet de comparer notre composition du parc en secteur d'activité avec le CEREN (voir Figure 55).

¹⁸ L'indice de cohérence rend compte de la fiabilité de l'information sur le nombre de bâtiments tertiaires, sous forme de pourcentage. La valeur est d'autant plus élevée que l'information territoriale est identique entre celle issue de la BD TOPO de l'IGN et celle issue des Fichiers Fonciers.

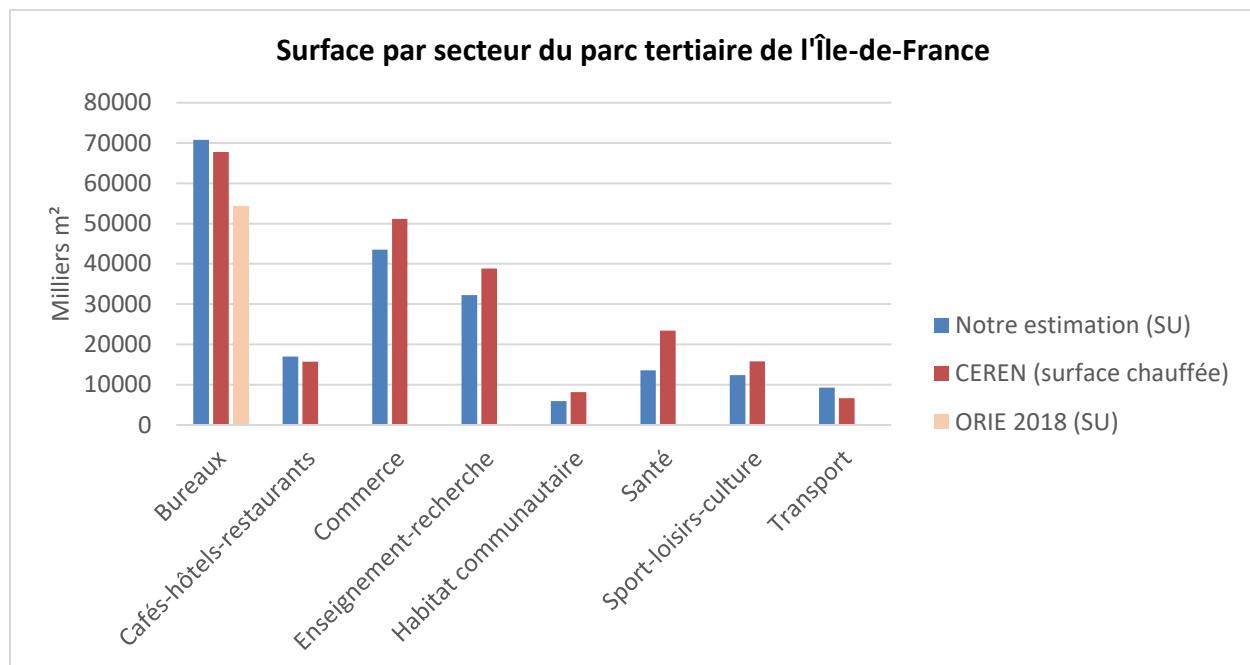


Figure 55: Surface totale par secteur d'activité du parc de l'Île-de-France

Nous n'incluons pas la base BâtiStato dans cette comparaison, car seule la partie « Tertiaire » mentionnée dans le Tableau 37 est divisée en secteurs d'activité (avec la même classification que le CEREN). Or cette partie ne représente que 41% de la surface totale.

La répartition entre secteurs d'activité est très similaire entre notre parc reconstitué et les statistiques du CEREN. Cette similitude est liée à la méthode commune de classification de l'usage des surfaces selon le code APE des emplois. Néanmoins, des différences apparaissent en valeur absolue : elles sont introduites par l'intégration du SIG et par les autres éléments méthodologiques propres à nos travaux. On peut notamment citer l'usage des définitions réglementaires des surfaces et la mixité tertiaire-résidentiel. Notons que la comparaison en Figure 55 est plus pertinente en ordre de grandeur qu'en valeur absolue, car l'attribution d'une Catégorie de construction à un bâtiment à partir du code APE majoritaire cache une partie de la variété des activités localisées dans un bâtiment.

Comme nous utilisons les données du CEREN à la maille régionale dans la méthode de distribution des sources d'énergie de chauffage, les parts de marché des énergies dans le parc reconstitué sont très similaires à celles du CEREN (voir Figure 56).

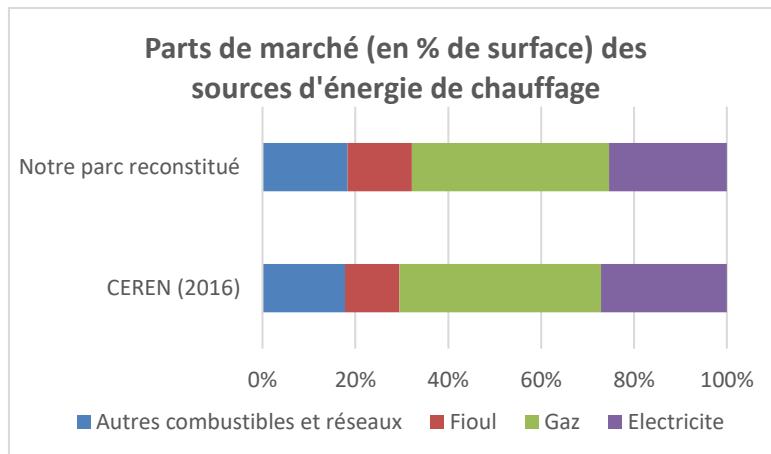


Figure 56: Parts de marché des sources d'énergie de chauffage

La ville de Paris dispose d'importantes ressources et des organismes spécifiques tels que l'APUR et l'APC, qui travaillent sur la description du parc de bâtiments de la capitale et sa demande énergétique. Grâce à ce levier, les données portant sur la ville de Paris sont notamment plus nombreuses que celles concernant la plupart des autres communes. Nous disposons de ce fait d'une base de comparaison de nos résultats.

Via notre méthodologie, 55 000 bâtiments parisiens sont identifiés comme lieux d'activités du secteur tertiaire, au total une surface utile de 69 millions de m². L'APC estime que la surface totale du parc tertiaire parisien était proche de 60 millions de m² en 2014 [66]. Pour mieux analyser l'écart, nous cherchons donc à établir les comparaisons à des mailles plus fines. Dans l'étude de Marty-Jourjon et al., 2018 [34], l'auteur propose une méthode d'estimation des surfaces de bureaux basée sur les ratios de surface par emploi, il l'applique aux arrondissements de la ville de Paris.

La méthode d'estimation de Marty-Jourjon est basée sur le nombre d'emplois de la base SIRENE et les ratios surface utile par emploi de l'ARENE (à la maille régionale) pour estimer la surface des bureaux. Pour estimer la part des emplois de bureaux dans les autres secteurs d'activité, les ratios du tableau 38 sont appliqués aux données de la base SIRENE.

| Codes NAF | Activités | % des postes de bureau | Codes NAF | Activités | % des postes de bureau |
|-----------|---|------------------------|-----------|--|------------------------|
| az | Agriculture, sylviculture et pêche | 18 | lz | Activités immobilières | 97 |
| bz | Industries extractives | 37 | ma | Act. juri., compt., gest., arch., ingé. | 93 |
| C | Industrie manufacturière : (ca, cb, cc, cd, ce, cf, cg, ch, ci, cj, ck, cl, cm) | 48 | mb | Recherche-développement scientifique | 93 |
| dz | Prdn & distr. élec. gaz vap. & air cond. | 61 | mc | Autres act. spécial., scientif. et tech. | 93 |
| ez | Gestion eau, déchets & dépollution | 61 | nz | Act. de svices administratifs & soutien | 83 |
| fz | Construction | 31 | oz | Administration publique | 95 |
| gz | Commerce ; répar. automobile & motocycle | 79 | pz | Enseignement | - |
| hz | Transports et entreposage | 65 | qa | Activités pour la santé humaine | - |
| iz | Hébergement et restauration | - | qb | Héb. méd.-soc. & soc. & ac. soc. ss héb. | - |
| ja | Édition, audiovisuel et diffusion | 98 | rz | Arts, spectacles & activités récréatives | 81 |
| jb | Télécommunications | 98 | sz | Autres activités de services | 78 |
| jc | Act. informatique & svices d'information | 98 | tz | Act. ménages: empl., prod. pr us. propre | 78 |
| kz | Activités financières et d'assurance | 97 | uz | Activités extra-territoriales | 78 |

Tableau 38: Estimations de la part des emplois de bureaux pour chaque activité NAF A38 (source: [34])

Lors de la reconstitution du parc, nous avons détecté que le nombre d'emplois déclaré dans la base SIRENE ne correspond pas forcément au nombre d'emplois sur place. De ce fait, nous ajoutons à cet exercice l'estimation de la surface avec le nombre d'emplois issu de la base d'Emploi au lieu de travail de l'INSEE 2017 [67] (disponible à l'échelle communale/arrondissement), en utilisant le Tableau 38, et les ratios du CEREN. Les résultats du modèle de Marty-Jourjon (appelé modèle d'Estimation de Parcs de Bâtiment de Bureaux - EPBB) sont comparés aux données de l'APUR et de l'ORIE (seulement disponibles pour 12 arrondissements). Dans la Figure 57, nous comparons la surface totale estimée par ces sources à nos résultats, et aussi à celle l'estimation de la surface par le nombre d'emplois au lieu de travail.

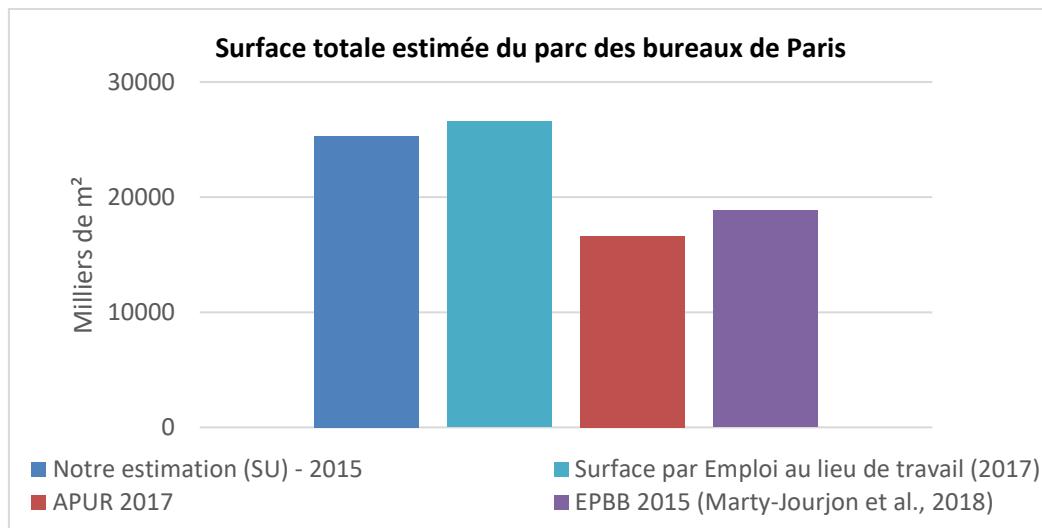


Figure 57 : Surface totale estimée du parc des bureaux de Paris

En reprenant la même comparaison dans l'étude de Marty-Jourjon et al., 2018 [34], la surface estimée pour chaque arrondissement est comparée en Figure 58.

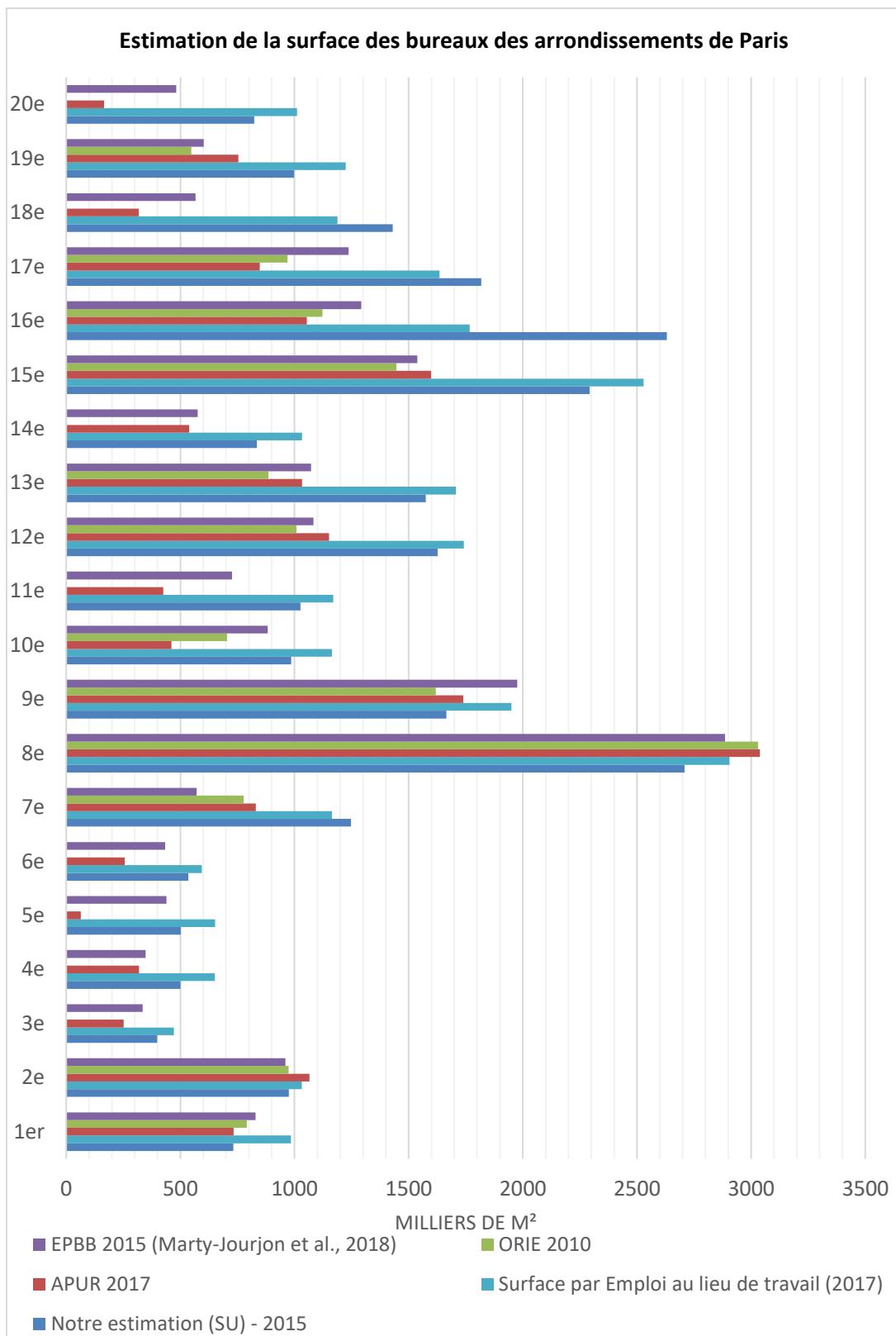


Figure 58: Estimation de la surface des bureaux des arrondissements de Paris

La comparaison en Figure 58 montre que les écarts ne sont pas homogènes, mais répartis inégalement selon les arrondissements. Concernant les écarts entre notre estimation et le modèle EPBB, l'explication principale est liée au fait que nous prenons en compte l'écart entre le nombre d'emplois déclaré et celui

sur place. Effectivement, le nombre d'emplois du secteur des bureaux (selon la classification du CEREN) que nous avons extrait de SIRENE 2018 est de 725 000 emplois, alors que ce nombre est de 1.16 millions selon la base d'Emploi au lieu de travail de l'INSEE 2017 (en utilisant le Tableau 38). La différence entre le nombre déclaré et celui sur place varie beaucoup d'un lieu à un autre, comme illustré dans la Figure 59.

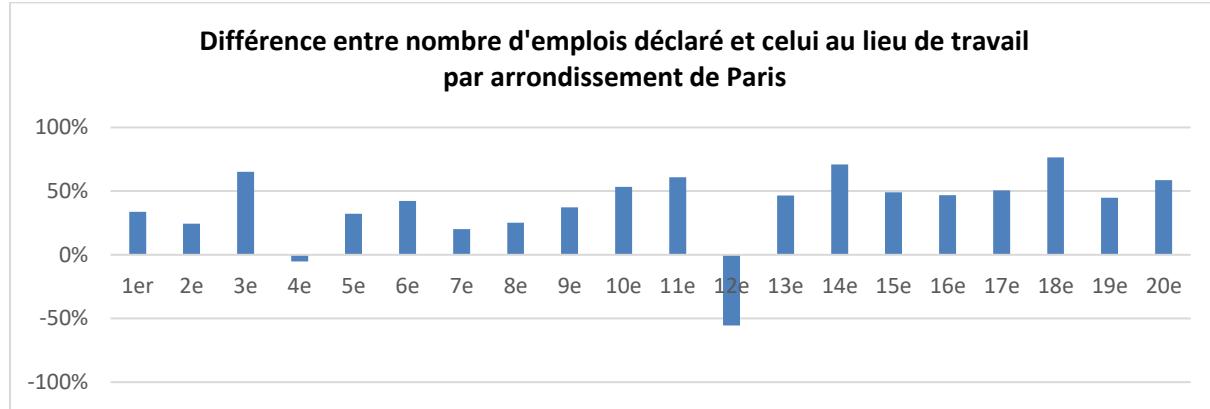


Figure 59: Différence entre nombre d'emplois déclaré et celui au lieu de travail par arrondissement de Paris

Nous pouvons constater dans la Figure 58 que l'estimation de la surface avec la base d'Emploi au lieu de travail est généralement plus proche de notre estimation sauf dans le 16^{ème} arrondissement. Même si nous employons la base SIRENE dans la reconstitution, notre méthode d'estimation est moins dépendante du nombre d'emplois grâce à l'usage du SIG. Dans le cas du 16^{ème} arrondissement, les causes de l'écart peuvent être multiples, il est donc difficile de trouver un facteur d'explication unique. Néanmoins, nous supposons qu'une surévaluation forte pourrait être causée par l'usage d'un taux de mixité plus faible qu'en réalité, en conséquence, une partie du résidentiel serait comptabilisée dans le parc tertiaire. Nous donnons une certaine crédibilité à cette piste, car notre taux de mixité est issu de notre sondage sur l'agglomération d'Orléans.

Etant donné que la définition de la surface n'est pas précisée dans l'étude de l'APUR, les écarts sont difficilement interprétables. Cette différence pourrait provenir des éléments méthodologiques sur les sources de données (MAJIC et SIRENE) et du choix du périmètre de l'APUR : « Afin de limiter l'exercice, tout en gardant la grande majorité des biens recherchés, seules les parcelles supérieures à 1 000 m² d'activités ont été retenues (environ 5 000 parcelles) ; de même, les entreprises ou établissements ayant plus de 50 salariés (environ 5 000 adresses) ». Grâce à la taille réduite de l'échantillon, l'APUR a pu vérifier sa cible, via plusieurs moyens (Google, societe.com, page jaune, etc.). Or, nous ne limitons ni le choix des établissements, ni le choix des bâtiments dans notre approche. En conséquence, le nombre de bâtiments dans la population reconstituée est très grand (55 000 individus dans Paris et 203 000 en Île-de-France). Il nous est donc impossible d'effectuer le même exercice de vérification que l'APUR dans le cadre de la thèse. Néanmoins, dans le futur, si la volonté d'étudier un territoire avec une certaine exigence est présente, les travaux de raffinement comme ceux de l'APUR pourront être apportés au parc reconstitué via le processus générique.

La reconstitution du parc francilien nous permet dans le paragraphe suivant de réaliser une simulation énergétique avec l'outil SmartE.

2. Résultats concernant la consommation d'énergie

2.1. Comparaison des résultats de la simulation énergétique avec des sources externes

Une fois le parc reconstitué et pleinement caractérisé, nous pouvons simuler sa demande énergétique annuelle avec l'outil SmartE. Les données météorologiques employées dans cette simulation sont issues de MeteoNorm [68], qui propose des données moyennées sur 10 ans (entre 2000 et 2010) à l'échelle départementale.

Nous avons constaté que le nombre d'emplois déclaré dans la base SIRENE ne correspond pas forcément au nombre d'occupants sur place, surtout dans les configurations complexes telles que des sièges sociaux. Il faut donc adapter le nombre d'occupants au sein de chaque bâtiment pour effectuer la simulation énergétique. Afin d'obtenir une estimation du nombre d'emplois dans chaque bâtiment, nous divisons la surface utile estimée par le ratio surface par emploi du CEREN correspondant au secteur d'activité majoritaire au sein du bâtiment. Au nombre d'emplois ajusté, nous ajoutons un nombre d'usagers maximal selon la méthode détaillée dans Etape 5 : Caractérisation des profils d'occupation (page 83). Rappelons- que dans l'outil SmartE, le paramétrage du modèle de bâtiment de type R6C2 est réalisé en fonction des caractéristiques telles que les coefficients de transfert thermique U (des murs, du plancher, du toit et des fenêtres), la surface déperditive, la surface des murs intérieurs, le volume d'air, etc.s Dans la simulation, chaque bâtiment est considéré comme homogène thermiquement (représentation thermique monozone). Les besoins sont ensuite transformés en appels de puissance via les rendements nominaux des systèmes. Notons que dans la version actuelle de SmartE, seules les efficacités des PAC et des climatiseurs varient en fonction de l'écart entre la température extérieure et la température intérieure. Les facteurs de charge, ainsi que la consommation des auxiliaires ne sont pas encore pris en compte dans le modèle.

En synthétisant les résultats de la simulation énergétique sur un an au pas de temps horaire, nous obtenons la consommation énergétique annuelle par usage de chaque bâtiment. Il est alors possible d'agréger les résultats afin de les confronter à des données de référence.

Pour valider les ordres de grandeur, nous confrontons la consommation totale d'énergie finale simulée du parc tertiaire aux sources régionales (voir Figure 60) telles que l'ADEME, le CEREN, la base ENERGIF et les données locales de l'énergie (électricité, gaz, réseaux de chaleur et de froid). Nous pouvons constater que, toutes énergies confondues, notre évaluation est relativement proche des données locales et des estimations du CEREN.

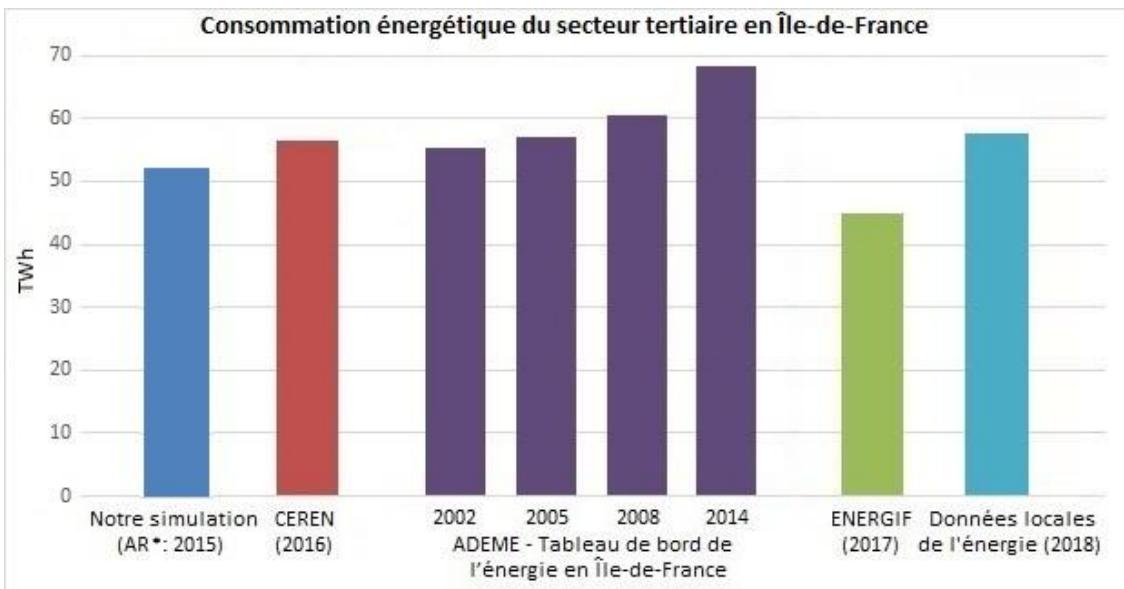


Figure 60: Consommation énergétique totale du secteur tertiaire en Île-de-France

*AR : année de référence

Les résultats de notre simulation sont également très proches des données des fournisseurs d'énergie concernant le gaz et les « Autres énergies », et de celles du CEREN concernant le fioul. Par contre, nous sous-évaluons la consommation d'électricité de 34% par rapport aux données locales et de 21% par rapport au CEREN. Etant donné que l'électricité est la source d'énergie la plus employée dans le parc tertiaire, il est nécessaire d'analyser cet écart. Rappelons que l'exploitation directe des données disponible est sujet à précaution :

- Concernant le CEREN, l'estimation par l'approche statistique comporte des biais liés à l'échantillonnage et la formulation de l'enquête,
- Concernant les données locales de l'énergie, la consommation est obtenue à partir des données fournies par les fournisseurs d'énergie. Or, la séparation entre le résidentiel et le tertiaire reste toujours problématique en raison notamment du poids du tertiaire diffus dans la consommation basse tension (« BT Bleu », puissance ≤ 36 KW) ;

Par ailleurs, il est possible également que certaines singularités du territoire francilien (poids des datacenters par exemple) ne soient pas fidèlement retracées par notre méthodologie, conçue pour être déployée sur tout territoire de France métropolitaine.

Nous cherchons alors à identifier, dans notre modèle de parc, les usages qui pourraient être à l'origine des écarts. Dans la Figure 66, nous observons la consommation énergétique par source d'énergie et par usage, obtenue par le regroupement des résultats de simulation des bâtiments tertiaires en Île-de-France.

La consommation énergétique du parc tertiaire des communes de l'Île-de-France

Notre simulation du parc

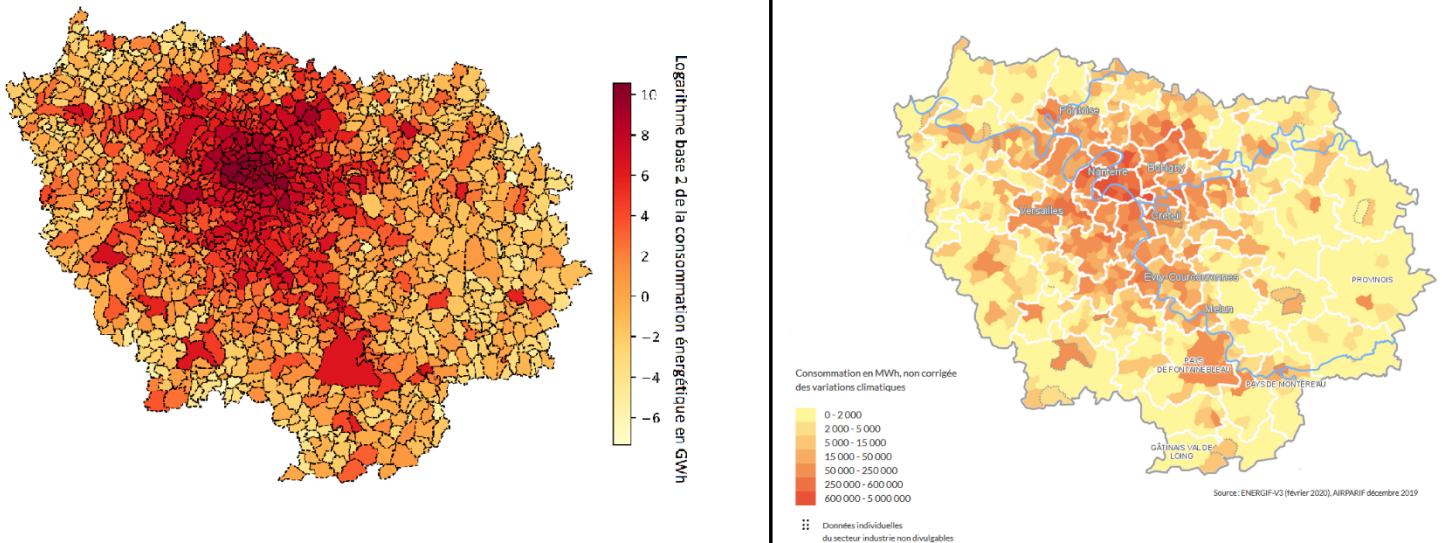


Figure 61: Cartographie de la consommation énergétique du parc tertiaire francilien

Sans surprise, notre répartition de la consommation énergétique par commune est proche de celle d'ENERGIF. Etant donné que la consommation est directement liée à la surface, il n'est pas étonnant que sa répartition soit très proche. A la différence de la méthode statistique (estimation avec ratios), la simulation à l'échelle du bâtiment permet d'avoir une description plus fine de la consommation (évaluation au niveau de bâtiments - même si ce sont des moyennes) et surtout, résulte pour une partie des usages au moins (chauffage, ECS, climatisation, éclairage) d'une simulation physique et technico-explicite simplifiée. Elle permet ainsi de mettre en évidence les différences de consommation surfacique annuelle ($\text{kWh/m}^2 \text{ SU/an}$) du parc tertiaire entre communes, qui dépendent de la structure sectorielle du parc (secteurs d'activités) mais aussi des caractéristiques des bâtiments. Les figures 62 et 63 en donnent une illustration pour Paris et les Hauts-de-Seine.

Consommation surfacique annuelle du parc tertiaire

Comparaison des arrondissements de Paris

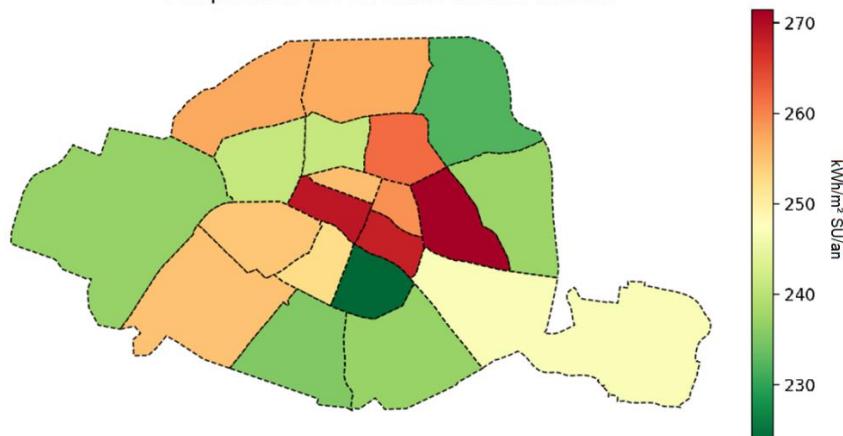


Figure 62: Consommation surfacique annuelle du parc tertiaire des arrondissements de Paris

Consommation surfacique annuelle du parc tertiaire

Comparaison des communes des Hauts-de-Seine

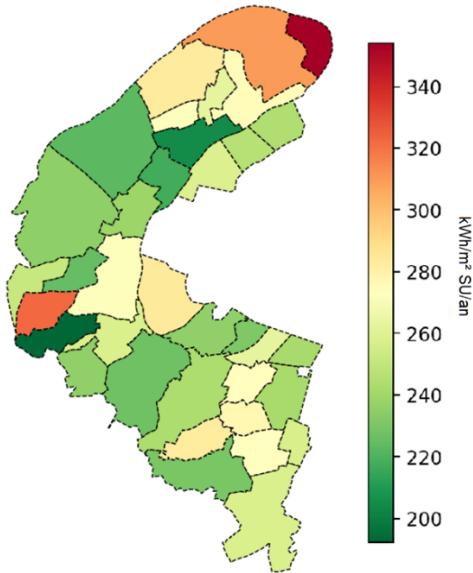


Figure 63: Consommation surfacique annuelle du parc tertiaire des communes des Hauts-de-Seine

Ces deux départements sont ceux qui ont le plus de surface bureaux dans la région Île-de-France. Mais sur ces figures, les quartiers d'affaires comme le QCA et la Défense ne se distinguent pas en termes de consommation surfacique annuelle (kWh/m² SU/an), car les bureaux franciliens ont une consommation surfacique plutôt dans la moyenne par rapport aux autres catégories (voir Figure 64).

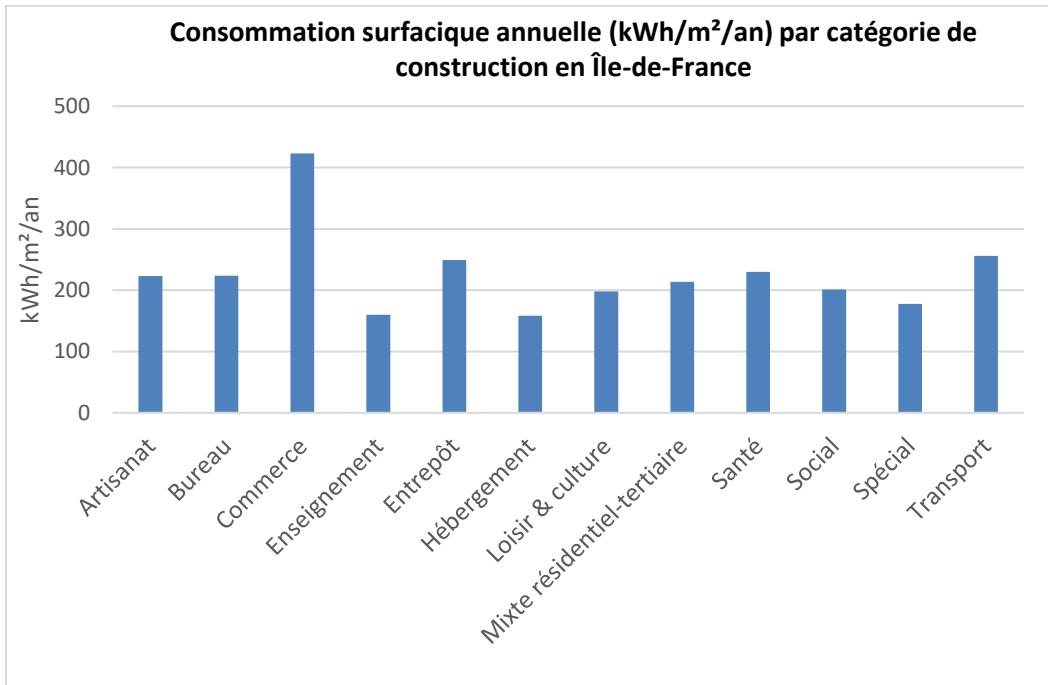


Figure 64: Consommation surfacique annuelle (kWh/m²) par catégorie de construction en Île-de-France

Dans la comparaison de la consommation totale (voir Figure 60), les valeurs des données locales de l'énergie (données de fournisseurs d'énergie), du CEREN et de notre simulation sont très proches. Afin d'analyser cette proximité, elles sont comparées par source d'énergie en Figure 65. Dans les données du CEREN, les réseaux de chaleur sont inclus dans la catégorie « autres ».

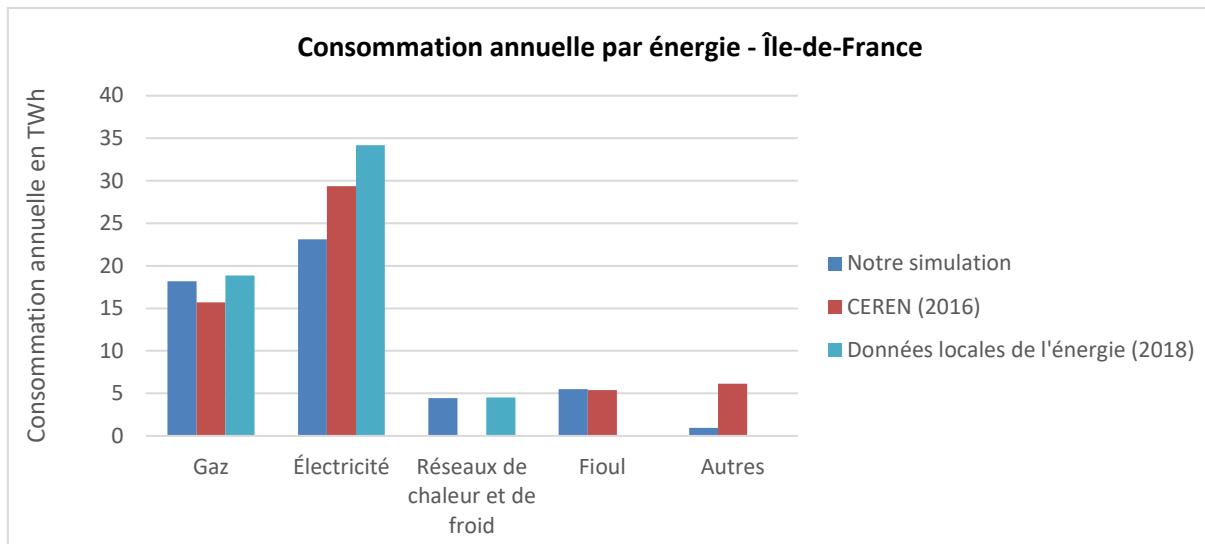


Figure 65: Comparaison de la consommation annuelle par source d'énergie du parc francilien

Nos résultats sont très proches des données des fournisseurs concernant le gaz de réseau et les « Autres énergies », et de celles du CEREN concernant le fioul. Dans la Figure 66, nous observons la consommation énergétique par source d'énergie et par usage, obtenue par le regroupement des résultats de simulation des bâtiments tertiaires en Île-de-France.

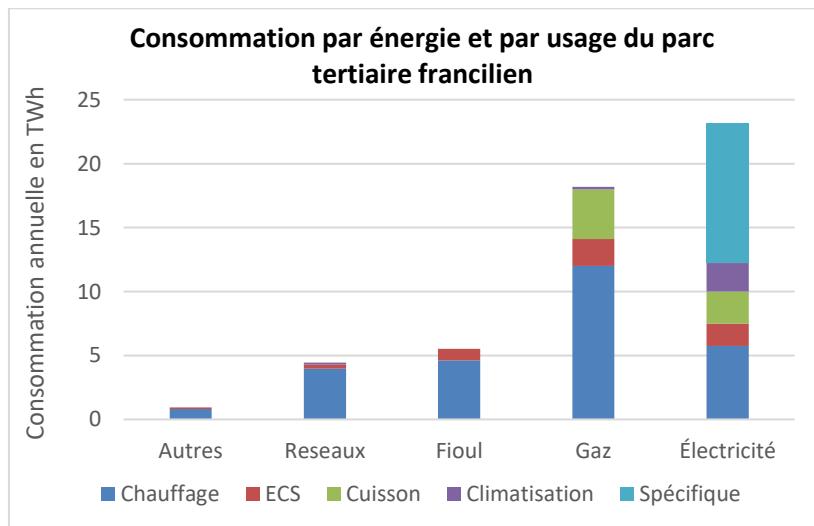


Figure 66: Consommation par énergie et par usage du parc francilien

La consommation d'électricité du parc tertiaire est marquée par l'importance de l'ensemble des usages spécifiques (éclairage, datacenters et autres spécifiques) et la climatisation. Nous remarquons que la particularité de l'électricité, par rapport aux autres sources, est son poids dans l'usage chauffage beaucoup moins important, bien que 27% de la surface du parc soit chauffée à l'électricité (CEREN 2016).

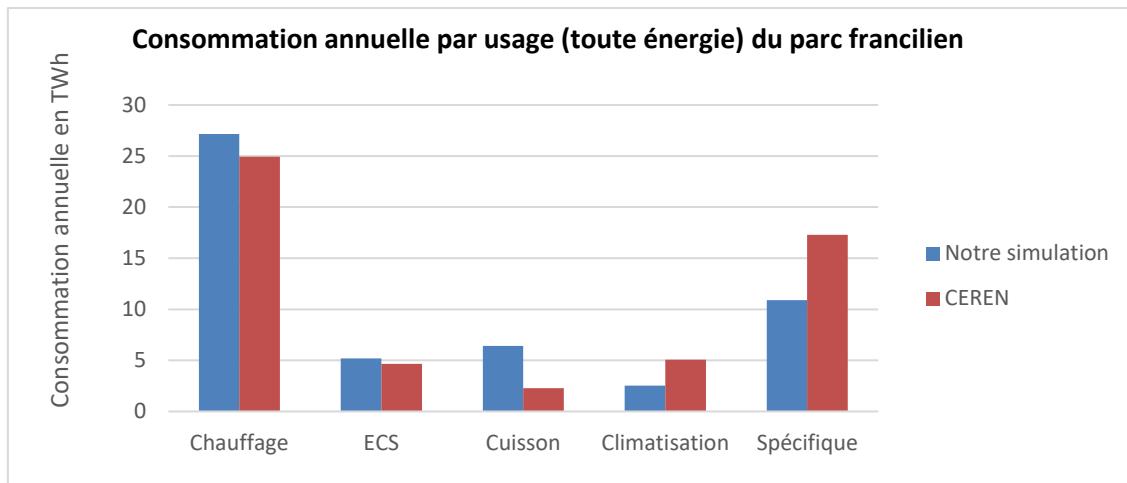


Figure 67: Comparaison de la consommation annuelle par usage (toute énergie) du parc francilien

La Figure 67 montre que les écarts entre notre simulation et l'évaluation du CEREN sont plus particulièrement prononcés pour la cuisson, la climatisation et les usages spécifiques. S'agissant de la cuisson, notre évaluation semble trop élevée et les principes de modélisation tout comme les hypothèses sous-jacentes gagneraient à être revus : le CEREN évalue les consommations de cuisson toutes énergies confondues à 10,8 TWh au périmètre France pour l'année 2016 et il n'est pas vraisemblable que l'Ile de France représente 50% du total. Quant à la climatisation, les ratios de consommation qui sous-tendent les consommations évaluées par le CEREN semblent très élevés (plus de 65 kWh/m²/an pour les bureaux) et ne s'accordent pas aux quelques données de terrain disponibles ou à ce que suggèrent de rapides calculs réalisés sur la base de la puissance machine installée et de durées d'utilisation¹⁹. Une partie de l'écart est probablement expliquée par le caractère dual de la climatisation : climatisation de confort, destinée à assurer le confort des occupants d'une part, climatisation de process dans les datacenters par exemple ou le secteur hospitalier, beaucoup plus intensive d'autre part. Il convient de noter en outre que les évaluations du CEREN comprennent la consommation des auxiliaires. Des différences de périmètre (quelle est la nature exacte des usages de l'énergie dont les consommations sont attribuées à la climatisation par le CEREN) sont sans nul doute à l'origine d'une partie des écarts. Il ne faut pas exclure que les hypothèses de la modélisation prennent également leur part dans les écarts constatés.

S'agissant enfin des « autres usages », qui concernent pour l'essentiel les usages spécifiques de l'électricité, plusieurs explications sur les écarts sont envisageables, au nombre desquelles le poids de certains usages massifs en Ile-de-France, tels que les datacenters. L'Ile-de-France concentre en effet près du tiers des datacenters de France (d'après datacentermap.com - inventaire des datacenters en colocation).

Nous remarquons aussi que la consommation de la climatisation ne représente qu'une petite part (voir Figure 68). L'impact d'une surévaluation ou d'une sous-évaluation de la climatisation n'est pas aussi important que celui lié aux usages spécifiques de l'électricité, qui représentent plus de la moitié de la consommation d'électricité.

¹⁹ Voir par exemple [69]

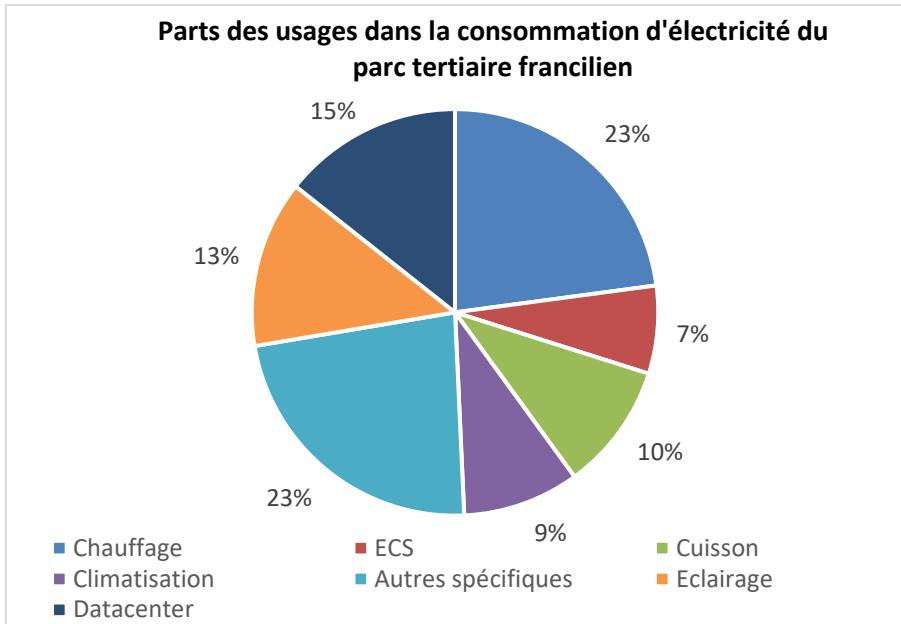


Figure 68: Consommation d'électricité par usage du parc francilien

En résumé, l'écart de la consommation d'électricité, constaté en Figure 65, peut résulter de plusieurs facteurs, mais avec les éléments ci-dessus nous supposons qu'il provient principalement d'une sous-évaluation des usages d'électricité spécifique. Notons que ceux-ci incluent les datacenters, l'éclairage, les autres usages spécifiques et auxiliaires. Or, de par le manque de données, la représentation des datacenters, des autres usages spécifiques et auxiliaires dans notre modèle repose encore sur beaucoup d'hypothèses (par exemple : la présence des employés, le dimensionnement et le mode de régulation). C'est donc un point d'amélioration pour de futurs travaux, si davantage de données deviennent disponibles.

2.2. Quelques illustrations des résultats : courbes de charge

La simulation dynamique avec l'outil SmartE nous permet d'établir les courbes de charge annuelles. Comme la simulation est effectuée à l'échelle du bâtiment, nous pouvons regrouper les courbes de charges selon différents critères : par source d'énergie, par usage, par catégorie de construction, etc.

Cette partie est consacrée à l'illustration des courbes de charge obtenues à partir de la simulation du parc reconstitué selon notre méthode. Afin d'alléger l'exercice, le parc de bâtiments du secteur tertiaire de la commune de Nanterre est simulé au pas de temps horaire sur un an. Ce parc est constitué d'un ensemble de 1400 bâtiments, dont les caractéristiques sont illustrées par la Figure 42.

Par le regroupement de tous les usages d'électricité au sein des bâtiments du parc, nous obtenons la courbe de charge d'électricité de la commune sur une semaine dans la Figure 69, qui illustre les cycles d'activité des emplois du secteur tertiaire.

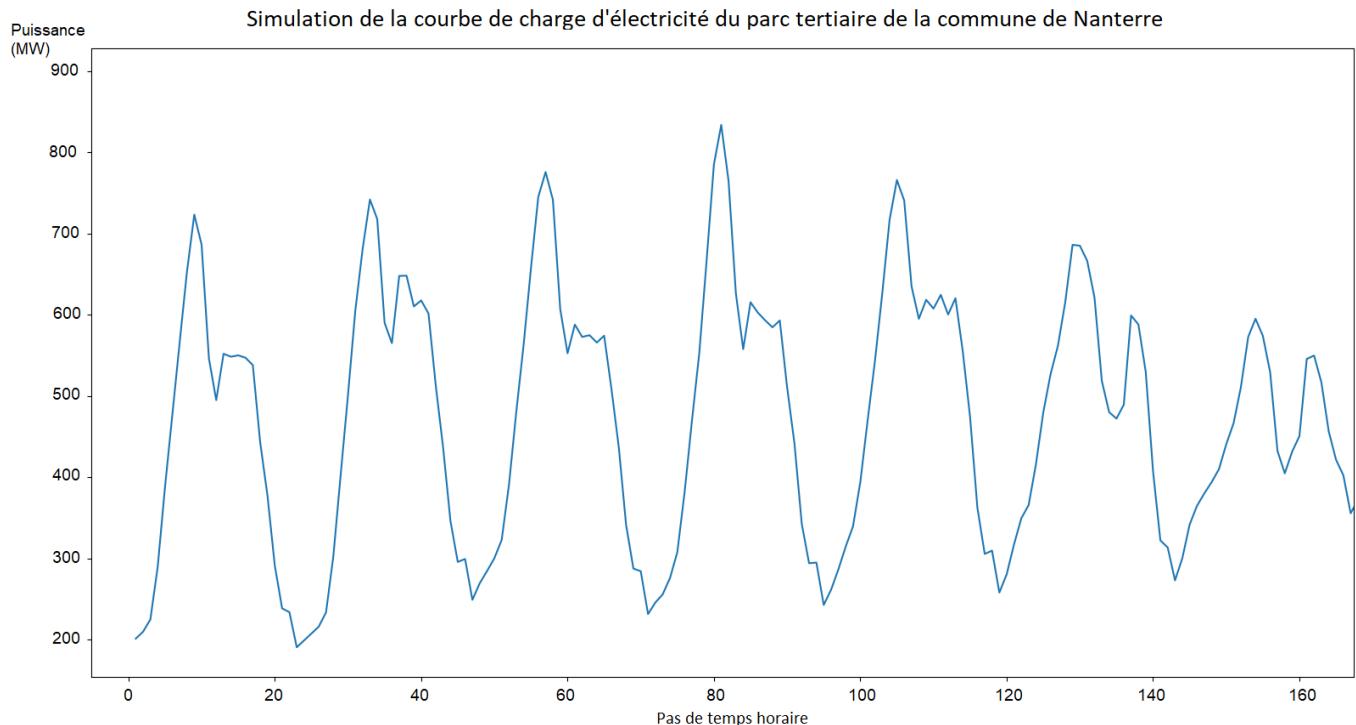


Figure 69: Courbe de charge hebdomadaire d'électricité simulée du parc tertiaire la commune de Nanterre

Comme mentionné précédemment, la courbe de charge de la commune résulte du regroupement des courbes de charge individuelles de chacun des bâtiments, qui se trouvent dans la Figure 70. Nous observons clairement l'effet de foisonnement.

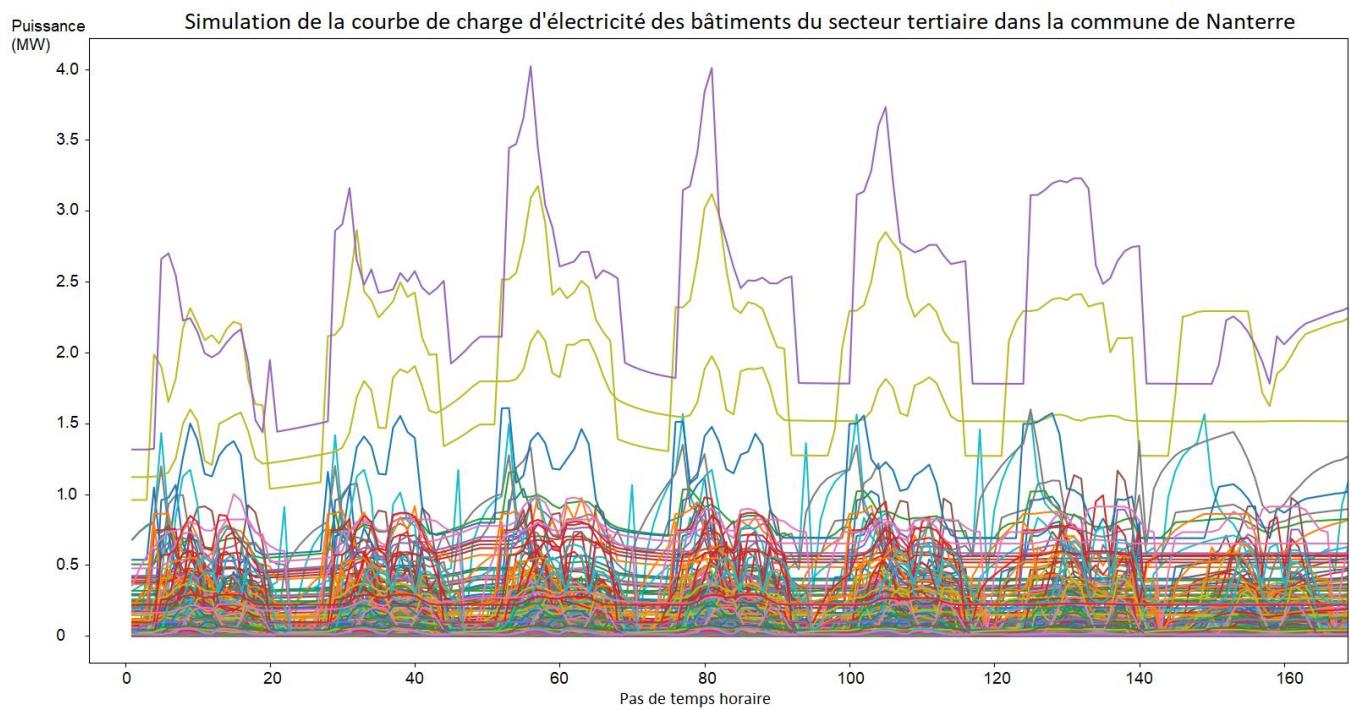


Figure 70: Courbes de charge annuelle d'électricité simulée des bâtiments du parc tertiaire de la commune de Nanterre

En prenant toute la période de la simulation, nous obtenons les courbes de charge d'électricité annuelle du parc communal de la Figure 71.

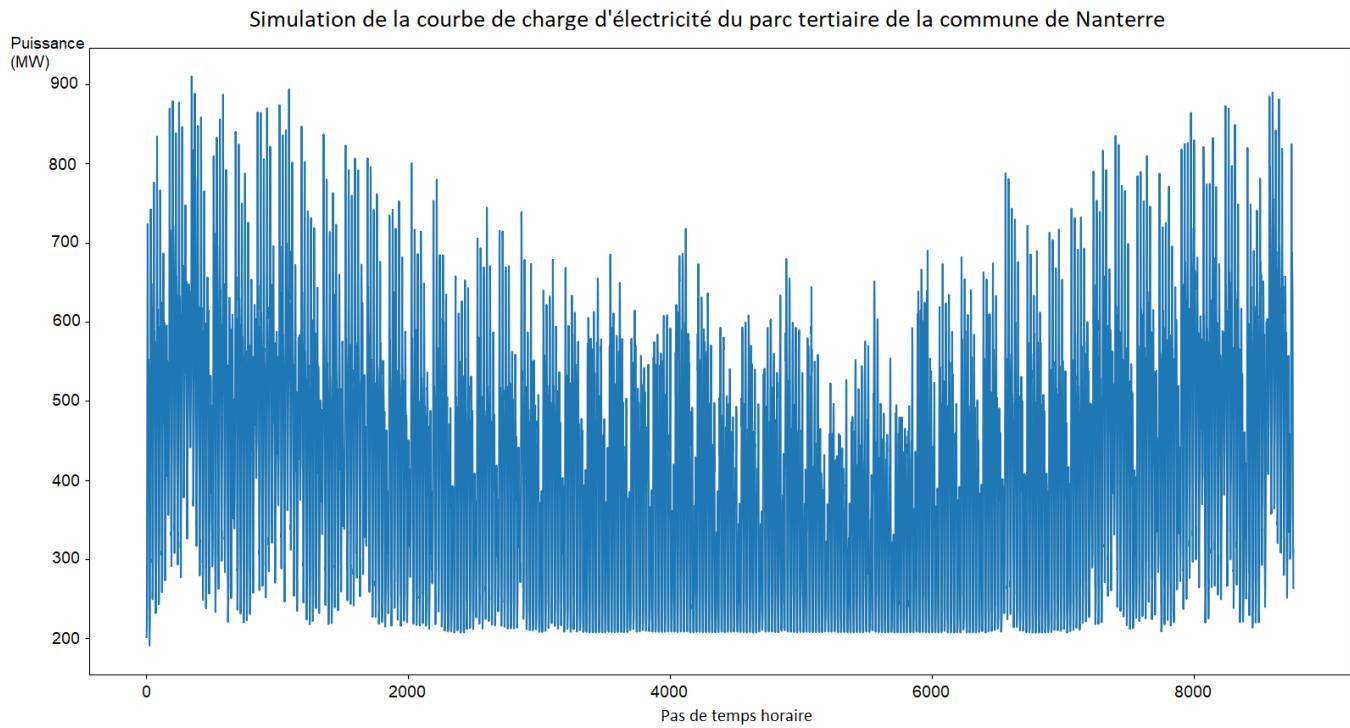


Figure 71: Courbe de charge annuelle d'électricité simulée du parc tertiaire de la commune de Nanterre

Sur cette courbe nous observons l'effet saisonnier lié à la demande du chauffage. Certains pics liés à la demande de climatisation sont également visibles en été (du 1^{er} Juin au 31 Août, soit entre les pas de temps 3624^e et 5808^e). Afin de mieux illustrer l'effet saisonnier, nous regroupons toutes les sources

d'énergie pour obtenir les courbes de charge par usage, sur une semaine d'hiver en Figure 72 et sur une semaine d'été en Figure 73. Nous remarquons que même en hiver, une demande de climatisation persiste liée aux locaux dont les charges internes sont importantes telles que les datacenters. Alors qu'en été, certains bâtiments peuvent solliciter le chauffage la nuit quand il fait froid à l'extérieur.

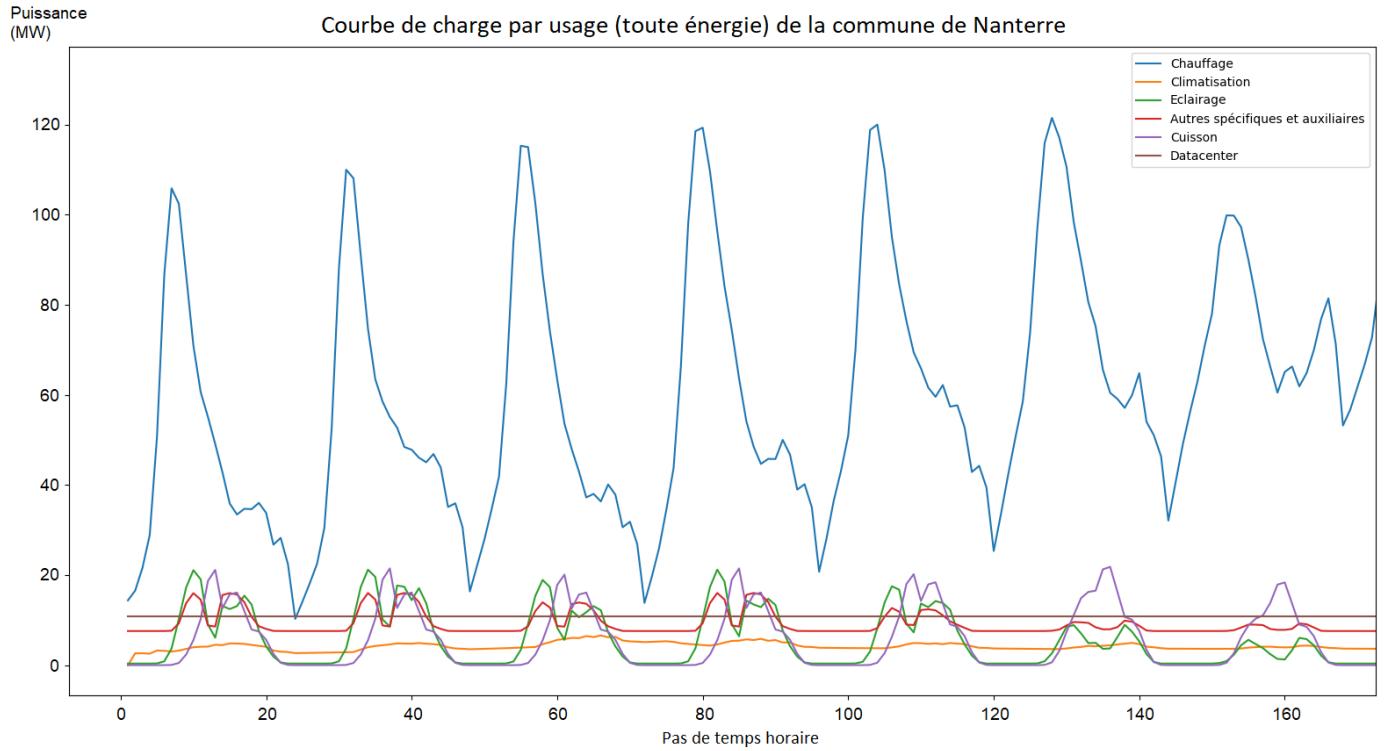


Figure 72: Courbes de charge par usage (toute source d'énergie) en hivers de la commune de Nanterre

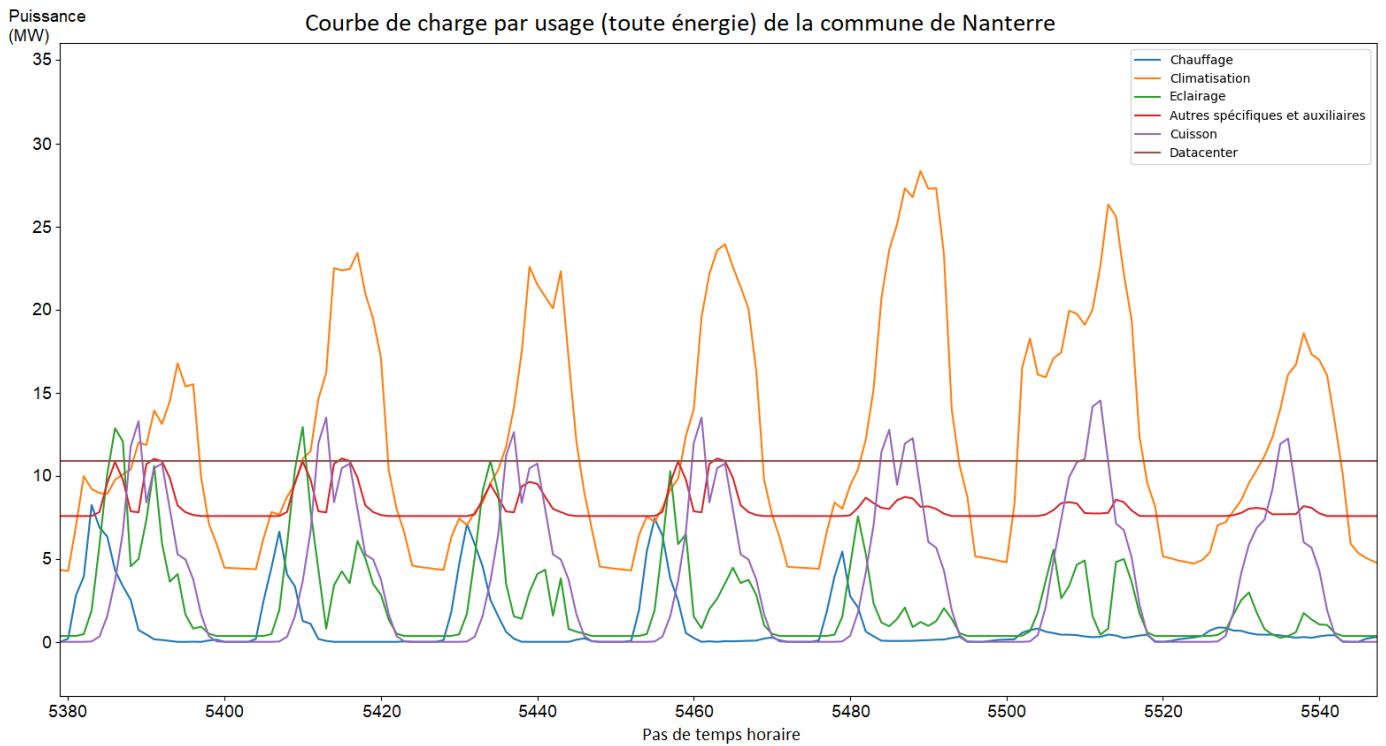


Figure 73: Courbes de charge par usage (toute source d'énergie) en été de la commune de Nanterre

3. Analyse de sensibilité et discussion des hypothèses

Dans cette partie nous allons analyser la sensibilité de nos résultats aux hypothèses qui peuvent être divisées en deux groupes : hypothèses de la phase de reconstitution du parc et celles concernant la simulation énergétique. Pour le premier groupe, nous proposons une analyse de sensibilité qui permet de quantifier l'impact de quelques paramètres sur l'évaluation de la surface d'un parc communal. Pour le deuxième groupe, l'exercice d'analyse de sensibilité est moins réalisable dans le cadre de la thèse, car le nombre de paramètres et de données en sortie de la simulation est très important. Pour cette raison, nous proposons une analyse sur les impacts d'un groupe réduit de paramètres : données météorologiques.

3.1. Analyse de sensibilité des paramètres de la reconstitution du parc

L'analyse de sensibilité porte sur l'Identification des bâtiments abritant des activités tertiaires avec le SIG (page 30) car c'est l'étape a priori la plus importante.

Cette analyse consiste à quantifier l'impact des 4 paramètres suivants sur la surface totale estimée du parc communal de Nanterre :

- Taux de conversion des tranches d'effectifs : paramètre d'estimation du nombre d'emplois d'un établissement à partir de sa tranche d'effectif (issu de la méthode de Marty-Jourjon et al., 2018 [34], voir Tableau 5). Pour faire varier l'effectif, nous utilisons un taux de conversion (tc_{ef}):
$$\text{Effectif retenu (tranche } x) = \text{borne inférieure (tranche } x) + tc_{ef} \times \text{borne supérieure (tranche } x)$$
- Seuil d'emplois qui permet la qualification d'un siège social. Ce paramètre est utilisé pour comptabiliser l'activité de bureau des sièges sociaux des établissements de codes APE industriels (voir Traitement des problèmes spécifiques : sièges sociaux, sites multi-bâtiments et absence de données géométriques, page 50)
- Seuil d'effectif des « petits » établissements. Dans le cas où un établissement correspond à plusieurs bâtiments, son effectif est affecté à un seul bâtiment selon sa surface.
- Hauteur d'étage : paramètre permettant d'évaluer le nombre d'étages via la hauteur du bâtiment.

Nous employons la méthode de Sobol [70] pour analyser ces paramètres. D'abord, nous établissons, selon la méthode de Saltelli [71], un échantillon dans lequel ces 4 paramètres varient entre deux bornes présentées dans le tableau 39.

| Paramètres | Bornes |
|--|------------|
| Taux conversion tranche d'effectif | [0 ; 1] |
| Seuil emplois siège social | [1 ; 200] |
| Seuil d'effectif « petits » établissements | [1 ; 200] |
| Hauteur d'étage | [2.5 ; 15] |

Tableau 39: Bornes de l'échantillonnage de l'analyse de sensibilité

L'échantillon généré contient donc 1000 combinaisons des 4 paramètres. De multiples sorties sont obtenues, mais pour alléger l'exercice nous observons la variation de la surface utile totale du parc en fonction de chacun des paramètres ci-dessus. Dans la Figure 74, chaque point correspond à la surface totale générée (axe Y) par une combinaison des 4 paramètres, même si les points s'affichent selon chaque paramètre séparé (axe X).

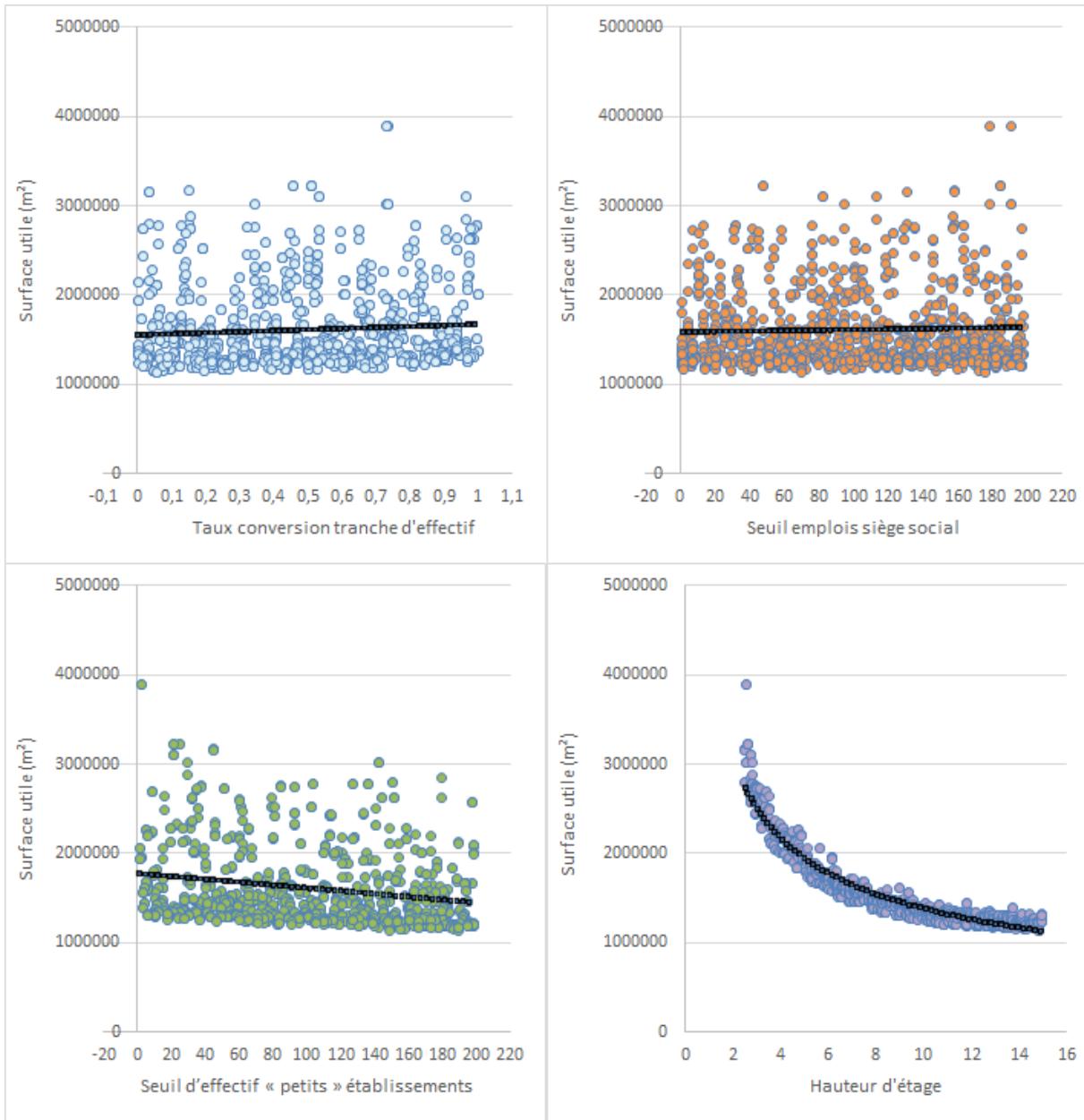


Figure 74: Variation de la surface totale du parc tertiaire de la commune de Nanterre selon les paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité

Nous constatons que l'impact des deux paramètres « Taux conversion tranche d'effectif » et « Seuil emplois siège social » est négligeable. Le « Seuil d'effectif « petits » établissements » a un très léger impact, presque négligeable. L'impact de la hauteur d'étage est en revanche très important. Ce constat est confirmé par les valeurs de l'indice de Sobol de 1^{er} ordre (voir Tableau 40) qui évalue la sensibilité de la surface totale en fonction de chaque paramètre. Sur la Figure 74, nous observons que la relation entre la surface totale et la hauteur d'étage n'est pas linéaire. Cette non linéarité résulte du fait qu'à partir d'une certaine valeur de la hauteur d'étage, la plupart des bâtiments du parc est considéré à un seul niveau (hauteur bâtiment < hauteur « théorique » d'étage). La surface estimée ne varie plus dès que la hauteur d'étage excède leur hauteur totale. Notons que la hauteur moyenne du parc tertiaire de la commune de Nanterre est de 12 m.

| x | Indice de Sobol de 1 ^{er} ordre |
|--|--|
| Taux conversion tranche d'effectif | 0 |
| Seuil emplois siège social | 0 |
| Seuil d'effectif « petits » établissements | 0,06 |
| Hauteur d'étage | 0,94 |

Tableau 40: Indice de Sobol de premier ordre

La méthode de Sobol permet non seulement d'évaluer la sensibilité vis-à-vis de chaque paramètre, mais aussi des couples de paramètres. Les valeurs de l'indice de Sobol de 2nd ordre du Tableau 41 montrent qu'aucun couple n'a un impact significatif sur l'évaluation de la surface totale.

| x1 | x2 | Indice de Sobol de 2 nd ordre |
|--|--|--|
| Taux conversion tranche d'effectif | Seuil emplois siège social | 0 |
| Seuil d'effectif « petits » établissements | Taux conversion tranche d'effectif | 0,003 |
| Taux conversion tranche d'effectif | Hauteur d'étage | 0,015 |
| Seuil emplois siège social | Seuil d'effectif « petits » établissements | 0 |
| Hauteur d'étage | Seuil emplois siège social | 0 |
| Seuil d'effectif « petits » établissements | Hauteur d'étage | 0,053 |

Tableau 41: Indice de Sobol de second ordre

Comme notre méthode d'estimation de surface repose sur le SIG, la hauteur d'étage a donc beaucoup plus d'influence que les données d'emplois, qui ne sont employées que dans les cas spécifiques (mixte résidentiel-tertiaire, manque de données géométriques). Ceci confirme les conclusions sur la hauteur d'étage de notre sondage in situ. Même si les paramètres « Taux conversion tranche d'effectif », « Seuil emplois siège social » et « Seuil d'effectif « petits » établissements » ont très peu d'impact, ils peuvent être très importants dans le calcul des charges internes et le pilotage des usages selon l'occupation (par exemple : la ventilation).

3.2. Analyse des hypothèses de la simulation énergétique

Dans cette partie, nous analysons les hypothèses concernant les données météorologiques.

Lors de cet exercice, certains résultats présentent des valeurs aberrantes liées à des locaux « mal » paramétrés (surface déperditive très petite). Les bâtiments concernés sont peu nombreux (environ 2-3% de l'échantillon) et n'ont pas d'impact important sur la consommation à l'échelle du parc grâce à la limite de puissance (ou puissance maximale) de chauffage et de climatisation. Après la suppression de ces bâtiments dans le parc reconstitué, la consommation du parc ne subit pas une variation importante (moins de 1%). Rappelons que les puissances sont calculées avant la simulation, lors de l'enrichissement des données des systèmes. L'erreur détectée sera éliminée dans la prochaine version de SmartE.

Dans notre première simulation de la région Île-de-France, les données météorologiques employées sont les données météorologiques moyennées de MeteoNorm. Or, les usages thermiques comme le chauffage et la climatisation sont très sensibles aux variations fortes telles que des canicules avec des pics de chaleur en été, et/ou un hiver plus froid et plus long. Dans cette décennie, la température en été en France est marquée par des épisodes caniculaires entre 2015 et 2020. Nous réalisons donc une simulation selon 3 variantes météorologiques (SCM) :

- SCM 1 : Une année correspondant au climat normal
- SCM 2 : Une année qui comporte un été chaud et un hiver froid
- SCM 3 : Une année qui comporte un été chaud et un hiver chaud

Notons que pour les besoins de ces simulations, « l'été » est compris entre le 1^{er} Juin et le 31 Août, et « l'hiver » entre le 21 décembre et le 20 Mars.

Le SCM 1 correspond aux données d'origine de MeteoNorm, tandis que les SCM 2 et 3 sont créés en modifiant le SCM1 de manière suivante :

- SCM 2 : Les flux solaires direct et diffus, la température extérieure et la température d'eau sont augmentés de 20 % (de leurs valeurs absolues) en été et diminués de 20 % (de leurs valeurs absolues) en hiver.
- SCM 3 : Les flux solaires direct et diffus, la température extérieure et la température d'eau sont augmentés de 20 % (de leurs valeurs absolues) en été et en hiver.

Les SCM sont comparés aux données météorologiques de Paris en 2018 et 2019, issues de la station Paris-Montsouris disponibles sur Infoclimat.fr [72]. Dans le Tableau 42, nous comparons les DJU (Degrés Jours Unifiés) annuels des données de mesure et des SCM. Les DJU se calculent selon la formule suivante :

$$\text{DJU}(\text{chauffage}) = \frac{T_{\min \text{ jour}} + T_{\max \text{ jour}}}{2} - T_{IR}$$

$$\text{DJU}(\text{climatisation}) = T_{IR} - \frac{T_{\min \text{ jour}} + T_{\max \text{ jour}}}{2}$$

Avec :

T_{IR} : Température intérieure de référence

$T_{\min \text{ jour}}$: Température minimale du jour

$T_{\max \text{ jour}}$: Température maximale du jour

Les DJU annuels est la somme des DJ quand ils sont positifs.

| Paris | Infoclimat (2018) | Infoclimat (2019) | SCM 1 (MeteoNorm) | SCM 2 | SCM 3 |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|
| DJU annuels (chauffage) K | 2048 | 2067 | 2684 | 2690 | 2494 |
| DJU annuels (climatisation) K | 591 | 476 | 141 | 376 | 376 |

Tableau 42: Comparaison des données météorologiques de Paris et nos scénarios de simulation – DJU

Nous observons que les DJU annuels (chauffage) du SCM 2 sont très proches de ceux du SCM 1 malgré un hiver plus froid. Cela est dû au fait que l'augmentation de la température en été dans le SCM 2 compense la baisse des DJU (chauffage) en hiver. Si nous ne conservons pas l'augmentation de température en été du SCM 2 (par rapport au SCM 1), les DJU annuels (chauffage) sont donc de 2786 K.

Le Tableau 43 montre la comparaison de la température extérieure des trois scénarios et les données de mesure de la station Paris-Montsouris (Infoclimat.fr [72]). Par rapport au SCM 1 dont la température moyenne annuelle est de 11.2°C, celles des SCM 2 et 3 sont respectivement 0.7°C et 1.2°C supérieures. La station météorologique de Paris-Montsouris enregistre une température moyenne annuelle de 13.8°C en 2018 et de 13.6°C en 2019. En première approximation, les températures du SCM 3 seraient plus proches des années 2018 et 2019 que les autres scénarios.

| Paris | | Température en °C | Infoclimat (2018) | Infoclimat (2019) | SCM 1 (MeteoNorm) | SCM 2 | SCM 3 |
|-------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|
| Hiver | Décembre | Moyenne | 8 | 8 | 5 | 4 | 6 |
| | | Maximale | 16 | 15 | 15 | 12 | 18 |
| | | Minimale | -2 | -1 | -5 | -6 | -4 |
| | Janvier | Moyenne | 8 | 5 | 4 | 3 | 5 |
| | | Maximale | 15 | 12 | 14 | 11 | 17 |
| | | Minimale | 2 | -2 | -7 | -8 | -6 |
| | Février | Moyenne | 3 | 8 | 4 | 3 | 5 |
| | | Maximale | 11 | 20 | 14 | 11 | 17 |
| | | Minimale | -7 | -1 | -6 | -7 | -5 |
| | Mars | Moyenne | 8 | 11 | 7 | 6 | 8 |
| | | Maximale | 19 | 22 | 19 | 15 | 23 |
| | | Minimale | -4 | 4 | -3 | -4 | -2 |
| Été | Juin | Moyenne | 20 | 21 | 16 | 19 | 19 |
| | | Maximale | 33 | 37 | 31 | 37 | 37 |
| | | Minimale | 11 | 10 | 6 | 7 | 7 |
| | Juillet | Moyenne | 24 | 23 | 19 | 23 | 23 |
| | | Maximale | 27 | 43 | 32 | 38 | 38 |
| | | Minimale | 15 | 13 | 8 | 10 | 10 |
| | Août | Moyenne | 22 | 22 | 19 | 23 | 23 |
| | | Maximale | 27 | 33 | 32 | 38 | 38 |
| | | Minimale | 10 | 12 | 8 | 10 | 10 |

Tableau 43: Comparaison des données météorologiques de Paris et nos scénarios de simulation – Température extérieure

Ces scénarios sont ensuite utilisés dans la simulation du parc tertiaire francilien²⁰, dont les données de la consommation énergétique sont déjà présentées précédemment. Dans la Figure 75, nous constatons que par rapport au SCM 1, la consommation annuelle du parc augmente de 1% dans le SCM 2 et diminue de 3% dans le SCM 1.

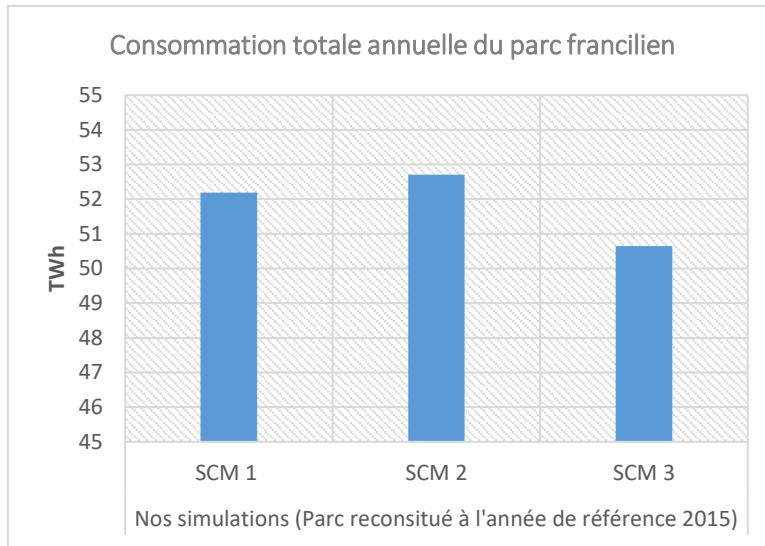


Figure 75: Comparaison des résultats de simulation des SCM – consommation totale annuelle du parc francilien

La Figure 76 montre la comparaison de la consommation de chauffage et de climatisation selon nos 3 scénarios. Nous constatons que l'augmentation de consommation totale du SCM 2 par rapport au SCM 1 est due surtout à l'augmentation de la consommation de climatisation. Rappelons-nous que les DJU annuels (chauffage) du SCM 2 sont très similaires au SCM 1 à cause de la compensation de la baisse de la température en hiver par la hausse en été.

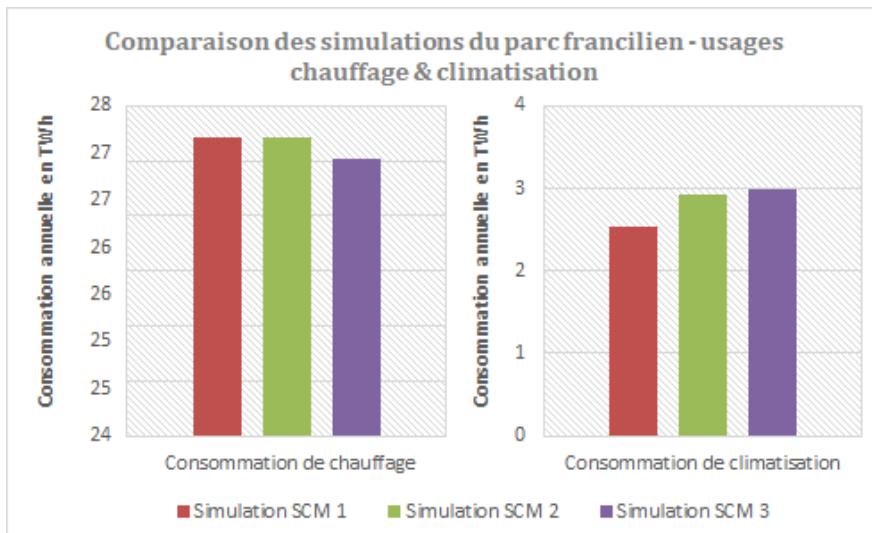


Figure 76: Comparaison des résultats de simulation des SCM – consommation annuelle de chauffage et de climatisation du parc francilien

Dans le SCM 3, la diminution de la consommation totale est principalement liée à celle du chauffage. Bien que la consommation de climatisation soit augmentée (du même ordre de grandeur que le SCM 2), la consommation totale baisse sensiblement car le chauffage a une part prépondérante dans la

²⁰ Les caractéristiques du parc ne changent pas par rapport à la première simulation

consommation. Nous constatons que le besoin de climatisation dans le SCM 3 est légèrement plus élevé que le SCM 2, ce qui s'explique par la climatisation permanente des datacenters due à la hausse de température en période hivernale.

En résumé, le modèle se comporte de manière cohérente en fonction de la variation des conditions météorologiques. Ces résultats montrent aussi l'importance du paramétrage des systèmes (taux d'équipement et dimensionnement), via l'exemple du besoin et de la consommation de chauffage.

3.3. Discussion des hypothèses

Cette partie nous a permis de prendre du recul par rapport à notre méthodologie et au rôle joué par certaines des hypothèses. Trois points importants sont relevés lors des analyses réalisées.

S’agissant de la reconstitution du parc, elles soulignent l’importance et l’apport des données issues des SIG, et en l’occurrence de la BDTOPO, ainsi que des hypothèses liées à la morphologie des bâtiments (hauteur d’étage). Dans notre approche, les données SIG permettent de pallier les limites des données disponibles concernant les emplois. On a remarqué que les données d’emploi ont peu d’impact sur l’évaluation de la surface totale du parc. Néanmoins, par la limite du périmètre de cette analyse, nous ne pouvons pas en juger quant aux autres caractéristiques du parc. Par exemple, l’affectation de la catégorie de construction est basée sur le code APE majoritaire en surface, elle-même estimée à partir du nombre d’emplois et du ratio surface par emploi. La variation des données d’emploi influence la distribution en catégories de construction, donc en date de construction ce qui a des conséquences puisque cette date intervient dans l’enrichissement en caractéristiques thermiques. Une meilleure fiabilité des données d’emplois est souhaitable dans les développements futurs. Le nombre d’emplois est aussi très important dans le calcul de charges internes, ainsi que dans la modélisation de certains usages liés aux occupants (comme l’ECS, ou l’éclairage). Nous pourrions estimer à nouveau le nombre d’emplois à partir de la surface SIG et du secteur d’activité majoritaire (déduit du code APE majoritaire).

Deuxièmement, comme notre méthodologie repose sur le SIG, les erreurs des données géométriques des bases SIG se répercutent dans notre parc reconstitué. Il est très difficile de quantifier ces erreurs, car il faut établir une comparaison détaillée à grande échelle entre les données SIG et les bâtiments réels. Devant l’intérêt croissant que suscitent ces sources de données, nous pouvons néanmoins raisonnablement anticiper un enrichissement et une fiabilisation de ces données dans les toutes prochaines années.

Troisièmement, l’analyse des simulations avec différentes conditions météorologiques souligne leur importance. Actuellement, l’outil SmartE emploie des conditions météorologiques moyennées (MeteoNorm). Afin de mieux simuler la consommation du parc existant, il faut donc passer aux données réelles quand elles sont disponibles.

Afin d’apporter les éléments de réponse aux difficultés restantes, des enquêtes *in situ* pourront permettre de quantifier les erreurs, valider ou remettre en question voir modifier les hypothèses.

V. Applications de la méthode de reconstitution du parc

Dans cette partie, nous présentons deux études réalisées à partir des résultats de notre méthode de reconstitution du parc tertiaire.

La première étude consiste à évaluer les gisements d'économie d'énergie pour l'usage chauffage des bâtiments du secteur tertiaire en Île-de-France. L'évaluation est réalisée via un scénario simple de rénovation du bâti et de changement des systèmes.

La deuxième étude porte sur l'évaluation des potentiels d'autoconsommation de l'électricité produite via des panneaux photovoltaïques installés sur le toit des bâtiments du secteur tertiaire dans l'Agglomération d'Orléans. Seule l'autoconsommation individuelle est considérée.

Ces études, nécessairement simplifiées, permettent d'illustrer les possibilités concrètement ouvertes par la reconstitution détaillée du parc de bâtiments du tertiaire issue de notre méthode.

1. Evaluation des gisements d'économie d'énergie pour le chauffage en Île-de-France

L'évaluation des gisements d'économie d'énergie suppose par principe la capacité à caractériser l'état courant du parc de bâtiments considéré et à spécifier un état cible. Cette évaluation est relativement aisée à l'échelle d'un bâtiment ou d'un faible effectif de bâtiments quand les caractéristiques et consommations sont accessibles. *A contrario*, l'évaluation des gisements à une vaste échelle géographique ou sectorielle est beaucoup plus délicate. Faute d'une connaissance précise du parc de bâtiments, la plupart des approches sont basées sur une représentation par segments auxquels sont associés des ratios de consommations. Le gisement est alors obtenu en appliquant à l'ensemble du parc les ratios correspondant aux segments du parc les plus efficaces. C'est par exemple l'approche retenue par le CEREN. D'autres approches reposent sur des évaluations à partir d'archétypes (voir par exemple l'étude « La rénovation énergétique des bâtiments de bureaux climatisés » réalisée par Energies et Avenir [73]), dont la fidélité et la représentativité sont alors discutables. Les résultats issus de l'application de notre méthode permettent d'envisager une approche détaillée tenant compte des spécificités des territoires ou secteurs considérés.

L'objectif de cette application strictement illustrative est d'évaluer les gains d'efficacité énergétique et les économies d'énergie résultant de la rénovation et du changement de systèmes de chauffage de l'ensemble des bâtiments existants du parc tertiaire francilien. Dans ce scénario, les bâtiments dont le niveau d'isolation de l'enveloppe (murs verticaux, plancher, toit et fenêtres) est inférieur à celui correspondant à une performance conforme à la RT 2012²¹, font l'objet d'une rénovation permettant d'atteindre une performance du bâti conforme à la RT 2012. Concernant les systèmes de chauffage, nous conservons les systèmes des bâtiments chauffés par une PAC et par le chauffage urbain. Les autres systèmes de chauffage sont en revanche remplacés, en utilisant les règles simples ci-dessous :

- Bâtiments d'une surface inférieure à 10 000 m² : PAC air/air,
- Bâtiments d'une surface supérieure ou égale à 10 000 m² : réseau de chaleur.

Une étude complète nécessiterait des règles plus sophistiquées, tenant compte notamment de la répartition spatiale des besoins de chaleur afin d'y adapter le mix énergétique.

Nous pouvons constater dans le Tableau 44 que les changements de système de chauffage affectent une très grande partie du parc francilien existant.

²¹ L'exigence de la RT 2012 sur les coefficients U est similaire à la RT 2005

| | Nombre de bâtiments concernés | Somme des surfaces utiles concernées (millions m ²) | Surfaces concernées par les travaux de rénovation (millions m ²) |
|--|-------------------------------|---|--|
| Isolation des parois opaques verticales | 148 461 | 153 (75% du parc) | 267 (surface intérieure des façades) 160 (surface extérieure des façades, surface mitoyenne exclue) |
| Isolation de la toiture | 159 625 | 164 (80% du parc) | 154 (surface de toit) |
| Isolation du plancher | 166 603 | 170 (83% du parc) | 91 (surface de plancher) |
| Changement des fenêtres | 149 501 | 154 (75% du parc) | 44 (surface vitrée) |
| Substitution par une PAC | 152 066 | 121 (59% du parc) | _____ |
| Substitution par un réseau de chaleur | 1 695 | 35 (19% du parc) | _____ |

Tableau 44: Quantité de travaux et changement de systèmes engendrés par notre scénario

Afin de mesurer les impacts globaux des modifications sur l'ensemble du parc, nous comparons les moyennes de Ubat et des rendements pondérés par la surface du parc initial à celles du parc modifié. Notons que Ubat (W/m².K) est le coefficient représentant les déperditions thermiques totales moyennes d'un bâtiment (parois et ponts thermiques). Dans la comparaison du Tableau 45, Ubat est calculé via la moyenne pondérée par la surface des coefficients U des façades, des fenêtres, du plancher et du toit. Les déperditions via les ponts thermiques sont prises en compte au travers d'un facteur fixé à 10 % des déperditions liées aux parois.

| | | Avant modification | Après modification |
|--|--|--------------------|--------------------|
| Ubat | Moyenne pondérée | 1.31 | 0.55 |
| | Écart-type de la moyenne pondérée | 0.65 | 0.14 |
| Rendement des systèmes de chauffage | Moyenne pondérée | 1.0 | 1.8 |
| | Écart-type de la moyenne pondérée | 0.38 | 0.57 |

Tableau 45: Impacts de la modification du parc sur l'isolation et le rendement des systèmes de chauffage

Le "rendement" des réseaux de chaleur est toujours pris égal à 1, car les pertes (production et transport) sont attribuées au secteur industrie/énergie.

Après modification du parc, nous constatons une diminution considérable de la valeur moyenne de Ubat. Ubat n'est pas uniforme sur le parc modifié (d'où un écart-type non nul). Ceci est lié aux différences de morphologie des bâtiments, et donc du poids variable des différents types de parois (opaques verticales, fenêtres, toiture, plancher) dans les déperditions.

Le Tableau 46 donne une appréciation qualitative du niveau d'isolation correspondant à plusieurs valeurs de Ubat.

| Valeur empirique de Ubat W/m ² | Niveau d'isolation correspondant à l'ordre de grandeur de Ubat |
|---|--|
| 0.3 | Isolation exceptionnelle |
| 0.4 | Excellente isolation |
| 0.75 | Isolation conventionnelle "RT2005" et réalisées entre 2007 et 2012 |
| 0.8 | Isolation conventionnelle "RT2000" et réalisées entre 2001 et 2006 |
| 0.95 | Construction entre 1990 et 2000 |
| 1.15 | Construction entre 1983 et 1989 |
| 1.4 | Construction entre 1974 et 1982 |
| > 1.8 | Bâtiment non isolée |

Tableau 46: Niveau d'isolation correspondant à l'ordre de grandeur de Ubat (source : ABC CLIM [74])

Suite à cette modification du parc, nous évaluons les économies d'énergie par différence entre les résultats de simulation du parc initial et du parc modifié. La simulation est réalisée avec les données météorologiques normalisées (MeteoNorm).

La Figure 77 permet de comparer les consommations annuelles et nous constatons une différence très importante dans la consommation totale.

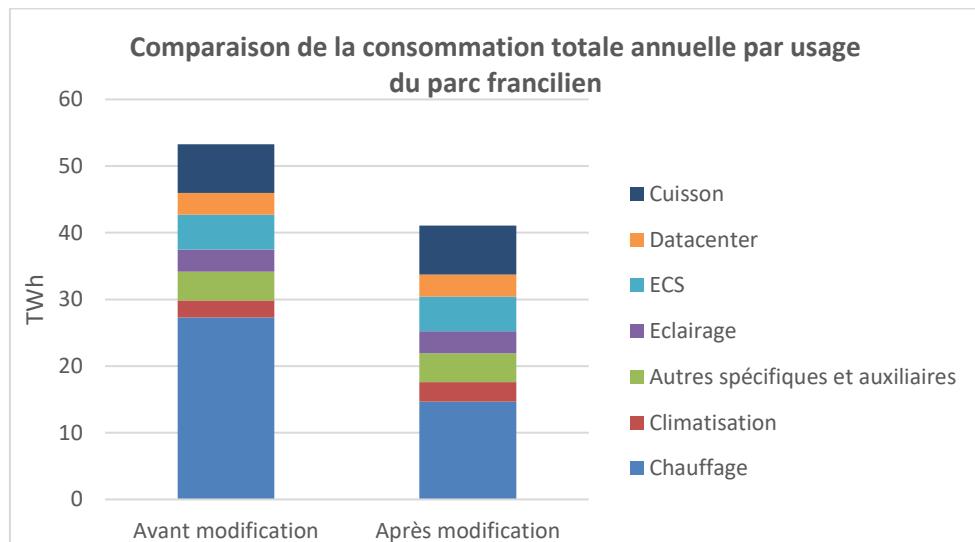


Figure 77: Comparaison avant et après modification du parc - consommation totale annuelle par usage de l'Île-de-France

Grâce à l'amélioration de l'isolation des bâtiments et la performance des systèmes de chauffage, la consommation totale d'énergie finale du parc tertiaire francilien est diminuée de 23 %, sachant que seuls le chauffage et la climatisation sont considérés dans le scénario de rénovation : la consommation d'énergie pour les autres usages est commune aux deux scénarios. La consommation du chauffage diminue de 46 % par rapport à l'état initial. Cependant, le niveau d'isolation plus important engendre une hausse de 14 % de la consommation de climatisation (voir Figure 78). Notons que le taux de climatisation reste identique. Comme la climatisation représente une proportion faible dans la consommation totale (5 % à l'état initial et 7 % après les changements), cette augmentation n'a que peu d'effet sur l'ensemble mais doit être signalée dans un contexte de hausse des taux d'équipement en climatisation.

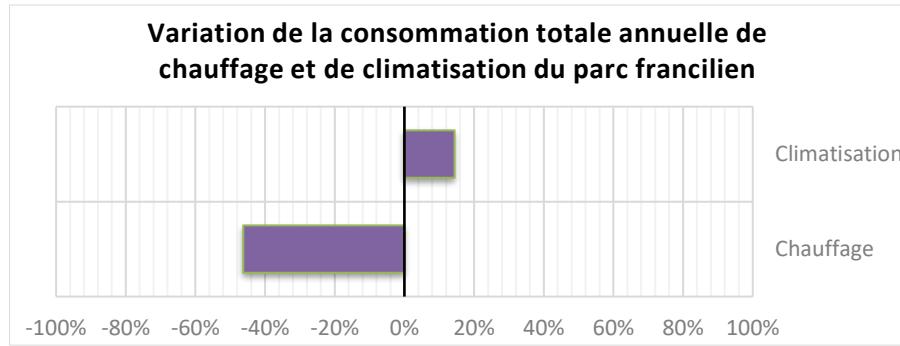


Figure 78: Comparaison avant / après modification du parc en consommation totale annuelle de chauffage et de climatisation du parc francilien

La Figure 79 illustre l'effet de la rénovation et du changement de système de chauffage sur la consommation surfacique annuelle ($\text{kWh/m}^2 \text{ SU/an}$) tous usages confondus par catégorie de construction. Les effets du scénario simulé diffèrent selon les catégories de construction. Les différences résultent principalement de deux types de facteurs :

- Facteurs liés aux caractéristiques du parc de chacune des catégories de construction,
- Facteurs liés au poids des usages chauffage et climatisation dans la consommation totale d'énergie.

S'agissant du premier type de facteur, les parcs de chacune des catégories de construction diffèrent sur plusieurs points influençant directement le besoin d'énergie. On peut notamment citer :

- La distribution des dates de construction : toutes choses égales par ailleurs, plus récent sera un parc, meilleure sera sa performance thermique globale à l'état initial.
- Le taux de mitoyenneté.
- La morphologie et notamment la surface développée, la compacité et le rapport entre surface développée et surfaces déperditives : plus vaste et plus compact sera un bâtiment, plus faible sera son besoin énergétique pour le chauffage.
- Le rapport entre surfaces vitrées et surfaces opaques et leur orientation, ainsi que les effets de masque.

L'interprétation complète des résultats nécessiterait ainsi une analyse approfondie des caractéristiques des parcs de chacune des catégories de construction, rendue possible par la reconstitution détaillée du parc.

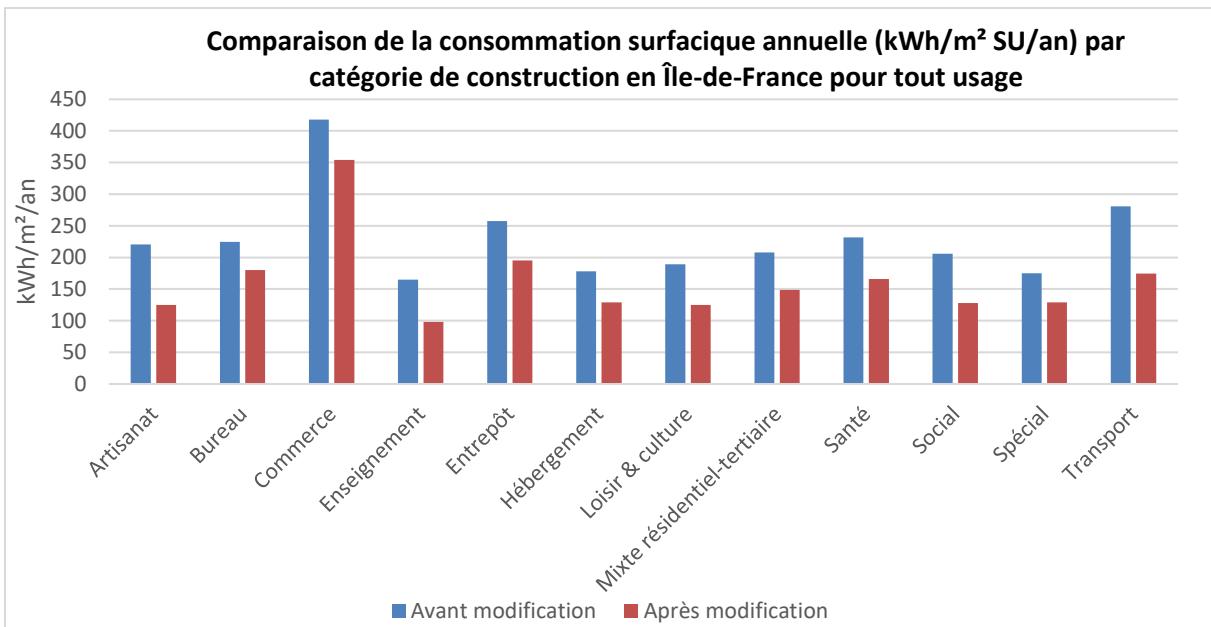


Figure 79: Comparaison avant /après modification du parc - consommation surfacique annuelle par catégorie de construction en Île-de-France pour tous usages

La Figure 80 permet de focaliser l'analyse des écarts entre parc initial et parc rénové sur la consommation surfacique annuelle de l'usage chauffage (kWh/m² SU/an) par catégorie de construction. Sans surprise, l'effet des rénovations apparaît de façon bien plus spectaculaire que dans le cas de la comparaison tous usages confondus. Dans le cas des Commerces par exemple, nous constatons que la baisse de la consommation surfacique globale, de l'ordre de 15 %, cache une baisse de plus de 50 % de la consommation surfacique annuelle du chauffage. La situation est toute différente dans le cas de l'Artisanat. Ces différences résultent directement des différences de poids de l'usage chauffage (et dans une moindre mesure de la climatisation) dans les consommations totales des bâtiments selon les catégories de construction, qui sont définies, rappelons-le, à partir des types d'activité majoritaire de chacun des bâtiments. Incidemment, ces résultats confirment que dans le cas des bâtiments du secteur tertiaire, les politiques d'efficacité énergétique ne peuvent se concentrer sur le seul usage chauffage.

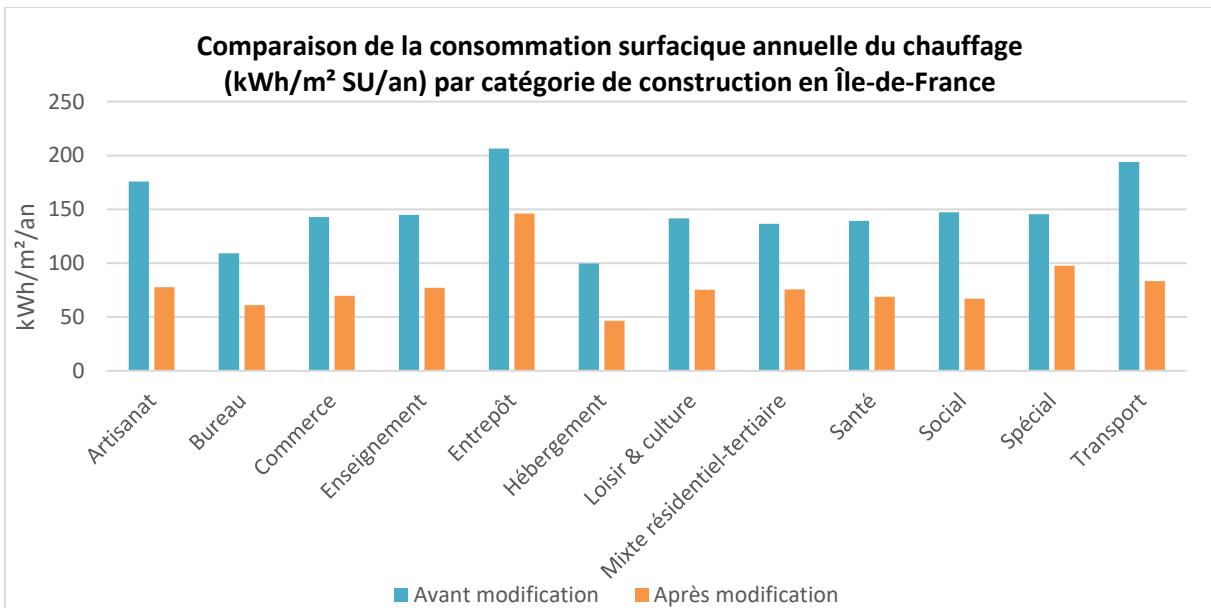


Figure 80: Comparaison avant /après modification du parc - consommation surfacique annuelle du chauffage par catégorie de construction en Île-de-France

Les travaux de rénovation dans le scénario de cette étude visent principalement à mettre les bâtiments anciens aux normes « équivalentes à la RT 2012 ». La Figure 81 illustre les économies d'énergie de chauffage réalisées (exprimées via la consommation surfacique) en fonction de la période de construction. Comme attendu, les gains d'efficacité énergétique sont d'autant plus importants que les bâtiments sont anciens. Nous remarquons également que la consommation surfacique de chauffage des bâtiments construits avant 1975 s'approche de celle des bâtiments postérieurs à 2005, alors que les bâtiments des périodes intermédiaires semblent légèrement moins performants après rénovation. Sans doute peut-on y voir l'expression des déterminants physiques et morphologiques de la demande évoqués précédemment, ainsi que des différences de mix énergétique à l'état initial.

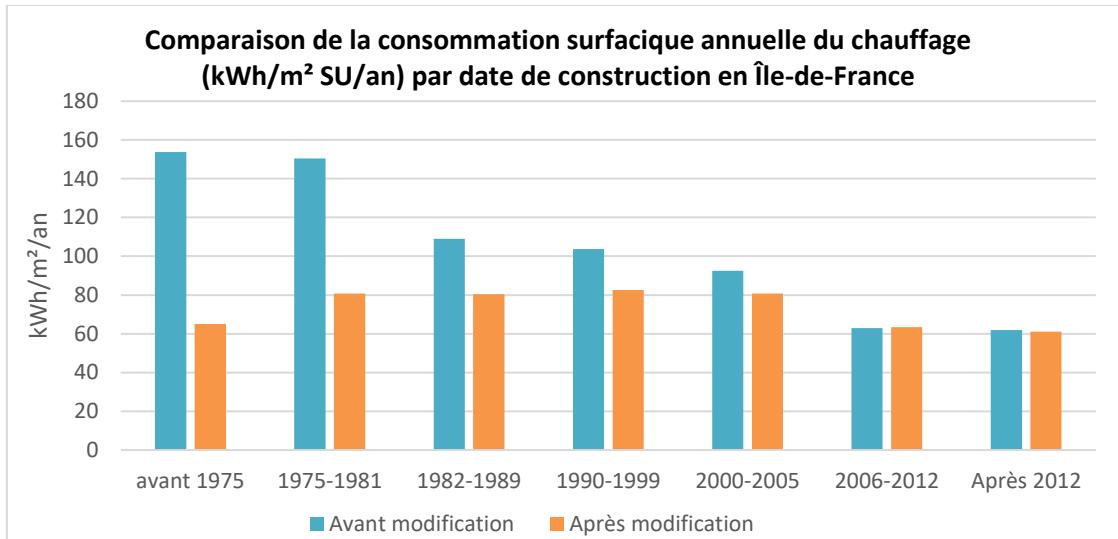


Figure 81: Comparaison avant / après modification du parc - consommation surfacique annuelle du chauffage par date de construction en Île-de-France

Dans la Figure 82, nous comparons l'économie de la consommation surfacique annuelle de chauffage des départements d'Île-de-France.

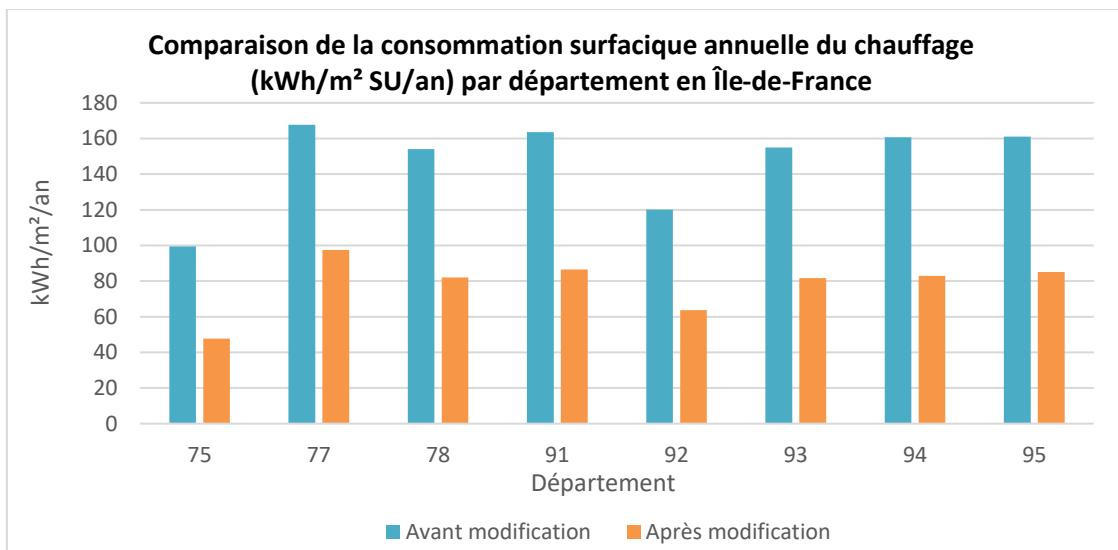


Figure 82: Comparaison avant / après modification du parc - consommation surfacique annuelle du chauffage par département en Île-de-France

Ce gain varie de 40 % à 50 %, Paris présentant le gain le plus élevé. Comme nous l'avons constaté dans la partie Résultats concernant la description du parc, le parc tertiaire de Paris comporte principalement des bâtiments anciens (construits avant 1975), dont les catégories majoritaires en termes de surface

sont « Bureaux », « Commerces » et « Enseignement ». C'est donc tout naturellement qu'ils présentent les potentiels les plus importants en proportion. L'analyse en valeur absolue est plus complexe. Outre les caractéristiques morphologiques et les dates de construction, une partie des différences entre départements est probablement liée à des différences de mix énergétique à l'état initial.

Cette étude permet de mettre en valeur l'intérêt de notre approche de reconstitution du parc. La prise en compte de l'hétérogénéité permet non seulement d'évaluer les économies d'énergie à grande échelle, mais aussi d'identifier les groupes de bâtiments dont les gains sont les plus importants. De plus, le regroupement des bâtiments peut être réalisé selon de multiples critères, ce qui permet un ciblage plus précis des segments à potentiel élevé.

On notera cependant que ces potentiels restent théoriques. Leur accessibilité technique n'est pas avérée. Pour ce faire, il serait nécessaire d'enrichir la caractérisation des bâtiments, et notamment leurs modes constructifs, qui déterminent par exemple les techniques d'isolation les plus adaptées et les niveaux de performance que l'on peut espérer. Dans nos estimations de potentiel, l'énergie consommée (chantier, transport, énergie grise des matériaux et systèmes, etc.) lors des opérations de rénovation et de changement de système n'est pas prise en compte. Cette partie sera nécessaire pour établir un bilan énergétique complet de ces opérations de rénovation.

2. Evaluation du potentiel d'autoconsommation photovoltaïque des bâtiments du secteur tertiaire dans l'Agglomération d'Orléans

L'efficacité énergétique et la décarbonation du mix énergétique sont affirmées comme objectifs majeurs de la transition écologique en France. En raison principalement du poids de ses usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson), le secteur du bâtiment est un levier majeur pour l'atteinte de ces objectifs. Le parc tertiaire présente d'intéressants potentiels d'autoconsommation d'électricité produite localement au moyen de panneaux photovoltaïques. Notre travail de reconstitution à la maille communale du parc de bâtiments du secteur en permet l'évaluation et l'analyse. Le plus souvent, les exercices d'évaluation à large échelle de production photovoltaïque se limitent au potentiel de production (combien pourrait-on produire ?) et ne déterminent pas l'équilibre offre/demande à l'échelle du bâtiment.

Cette voie de valorisation des résultats issus de l'application de notre méthode a été investiguée dans le cadre de travaux que j'ai co-encadrés au sein d'EDF R&D. Les travaux de qualification, d'évaluation des potentiels (conception, codage, test et exploitation des modèles sous Python) et les premières analyses des résultats ont été menés par Mme Maryam Sadighi au titre de son stage de fin d'études de Master (Master RENE – Ecole Polytechnique/KTH/ESADE). Cette étude avait pour objectif l'évaluation des potentiels de production et d'autoconsommation via l'installation des panneaux photovoltaïques sur le toit des bâtiments du secteur tertiaire de l'Agglomération d'Orléans.

La comparaison entre différentes stratégies d'installation et d'exploitation des systèmes photovoltaïques permet de définir différents scénarios selon des critères techniques (surface du toit disponible, demande d'électricité du bâtiment) et économiques (retour sur investissement de l'installation).

Dans le cadre de cette étude, quatre types de potentiels sont envisagés :

- **Potentiel technique maximal** : Toute la surface accessible (après prise en compte des masques solaires et de la surface occupée par d'autres systèmes sur le toit²²) est couverte par des modules photovoltaïques.
- **Autoconsommation maximale** : Dimensionnement du système photovoltaïque de sorte que toute l'énergie produite soit consommée sur place. Dans cette configuration, il n'y a pas de production excédentaire.
- **Autoproduction maximale** : Le dimensionnement de l'installation photovoltaïque est prévu pour couvrir un maximum de la demande en électricité du bâtiment. La limite supérieure est la surface de toit accessible. Dans ce cas, une partie de l'énergie produite peut ne pas être consommée localement.
- **Potentiel optimal économique** : L'installation des systèmes photovoltaïques est analysée en tant que projet d'investissement au niveau de chaque bâtiment du parc. Sa rentabilité est analysée dans l'hypothèse de 100 % de capitaux propres.

Les notions d'autoconsommation et d'autoproduction sont définies comme suit, selon les termes du Ministère de la Transition Écologique [75] :

« L'autoconsommation peut se définir comme le fait de consommer sa propre production d'électricité. Elle est associée à la notion d'autoproduction, qui est le fait de produire sa propre consommation. »

L'analyse des potentiels est réalisée via des indicateurs énergétiques et économiques. Les trois indicateurs sont :

- **Taux d'autoproduction (%)** = production consommée sur place / consommation totale
- **Taux d'autoconsommation (%)** = production consommée sur place/ production totale
- **Taux de Rentabilité Interne (TRI)** qui est le taux d'actualisation qui permet d'égaliser la Valeur Actualisée Nette (VAN) de tous les flux financiers liés à la valeur de l'investissement

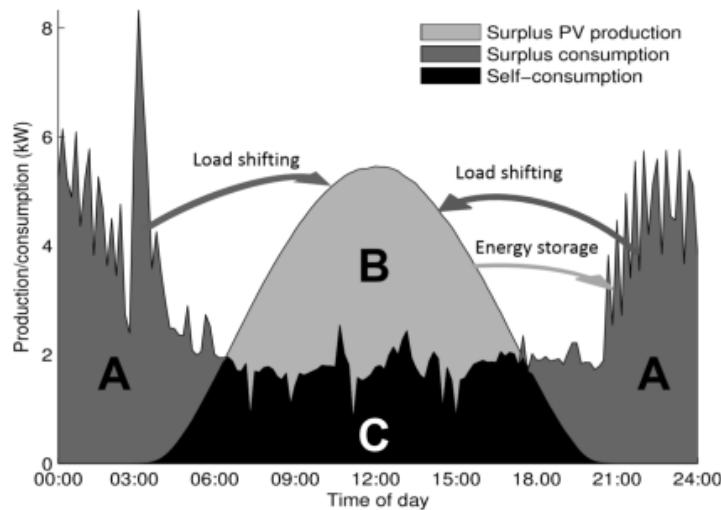
²² Cette déduction est réalisée via des ratios

initial d'un projet d'investissement. Cet indicateur permet de mesurer la pertinence financière d'un projet.

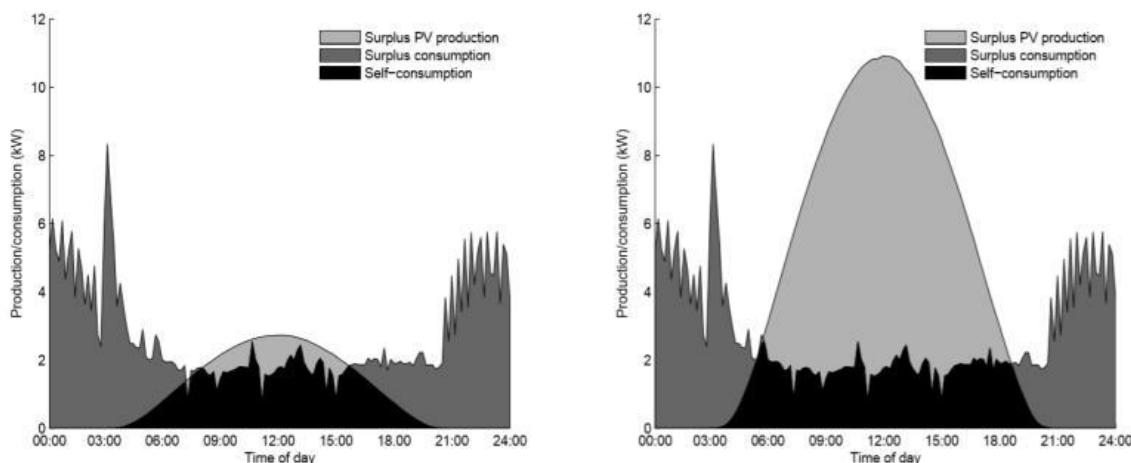
La Figure 83 permet d'illustrer le calcul du taux d'autoconsommation et du taux d'autoproduction comme suit :

$$\text{Taux d'autoconsommation (\%)} = \frac{C}{B+C}$$

$$\text{Taux d'autoproduction (\%)} = \frac{C}{A+C}$$



L'augmentation de la production photovoltaïque par rapport à la demande énergétique du bâtiment entraînera toujours une diminution de l'autoconsommation, tandis que l'autoproduction sera accrue ou restera inchangée, comme le montre la Figure 84: Illustration de la variation de la production photovoltaïque et des taux d'autoconsommation et d'autoproduction (source : [76])



Dans le cadre du stage, deux de ces quatre scénarios (**Potentiel technique maximal** et **Autoconsommation maximale**, soit 100 % d'autoconsommation) sont évalués pour l'agglomération d'Orléans à partir de deux types de résultats issus de l'application de notre méthode :

- Une description détaillée et géolocalisée de chacun des bâtiments composant le parc de bâtiment tertiaire de l'agglomération,
- Les courbes de charge électriques simulées au pas de temps horaire de chacun de ces bâtiments.

Ce travail ne vise pas à donner des résultats définitifs mais constitue une illustration concrète des résultats potentiels auxquels notre méthode permet d'accéder.

La Figure 85 montre la différence importante de production annuelle selon les scénarios. La maximisation du taux d'autoconsommation suppose ainsi une surface installée de panneaux nettement plus faible que ce qu'autorise le potentiel technique maximal (200 000 m² contre 3,5 millions de m²).

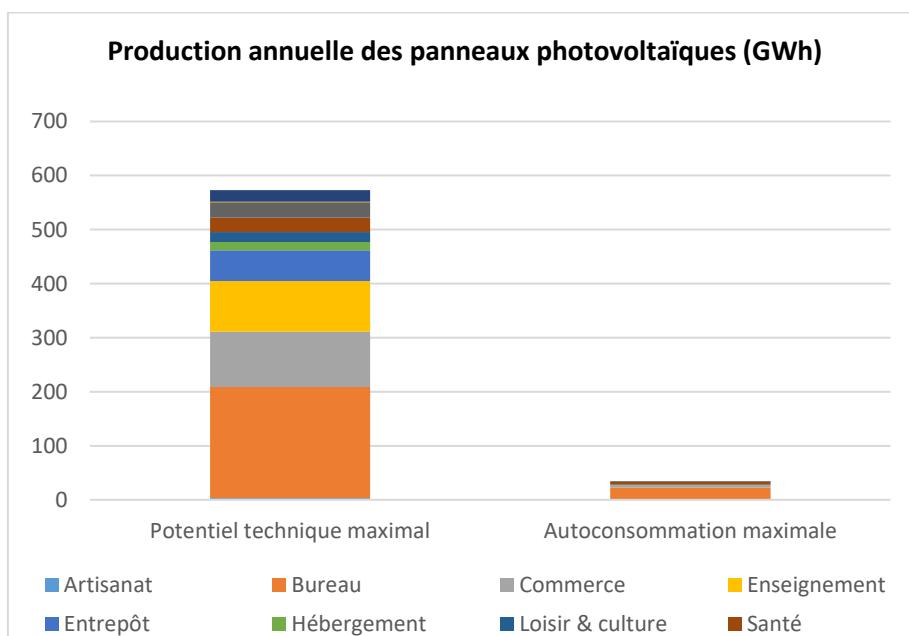


Figure 85: Comparaison de production annuelle par catégorie de construction des panneaux photovoltaïques selon deux scénarios (source : rapport de Maryam Sadighi)

Selon les résultats de la simulation énergétique avec SmartE, les bâtiments tertiaires de l'Agglomération d'Orléans consomment environ 651 GWh d'électricité par an, dont la moitié est consommée par les bureaux. Les commerces se trouvent en deuxième position avec 23 %. La production annuelle d'électricité obtenue par l'exploitation du potentiel technique maximal représenterait 88 % de la consommation annuelle d'électricité du parc tertiaire de l'Agglomération d'Orléans. La contrainte d'une autoconsommation à 100 % de l'électricité produite à l'échelle de chacun des bâtiments diminue drastiquement le potentiel de production, qui tombe à 5 % environ de la consommation annuelle. Dans ce scénario toute l'électricité produite est consommée par le bâtiment producteur et ne subit en conséquence aucune perte liée aux réseaux de transport et de distribution d'électricité.

Notons qu'il ne faut pas confondre les taux d'autoconsommation et d'autoproduction avec le rapport production totale sur consommation totale (88 % et 5% dans les deux scénarios), qui correspond donc à $\frac{B+C}{A+C}$ dans la Figure 83.

Rappelons que les résultats ci-dessus sont obtenus à partir des simulations à l'échelle du bâtiment. Les taux d'autoproduction et d'autoconsommation sont établis via la superposition de la courbe de production et de la courbe de charge d'électricité de chacun des bâtiments simulés. Il est donc possible

d'affiner l'analyse des résultats, par exemple en opérant des regroupements par catégorie de construction. On obtient alors les résultats des figures Figure 86 (scénario potentiel technique maximal) et Figure 87 (scénario autoconsommation maximale). Les différences entre catégories de construction sont la conséquence de l'hétérogénéité des bâtiments en termes de morphologie (donc surface de toit), mais aussi d'activités, de caractéristiques thermiques et de systèmes utilisés pour les usages concurrentiels de l'énergie (donc courbes de charge).

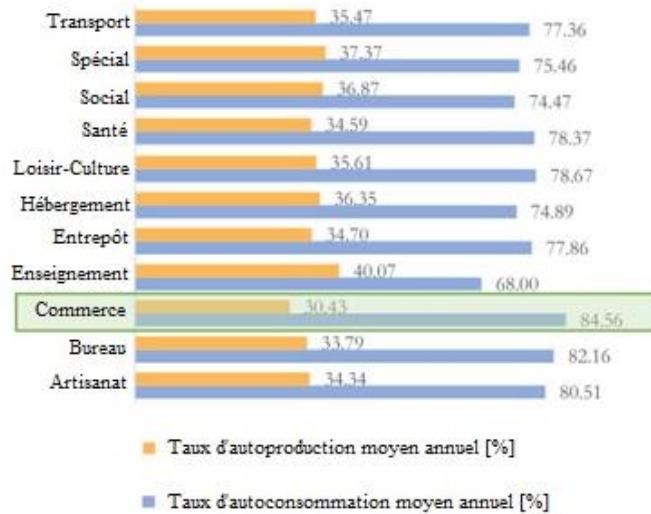


Figure 86: Taux d'autoproduction et d'autoconsommation moyens annuels par catégorie de construction – Potentiel technique maximal (source : rapport de Maryam Sadighi)

Dans le scénario de potentiel technique maximal, la catégorie Commerces (surlignée en vert) a le taux d'autoconsommation le plus élevé (85 %) et en même temps le taux d'autoproduction le plus faible (30 %).

Nous constatons Figure 87 que le taux d'autoproduction est très faible dans le scénario où le taux d'autoconsommation atteint son maximum. Dans cette configuration, les installations photovoltaïques ne couvrent plus qu'environ 5 % de la consommation d'électricité totale des bâtiments du parc tertiaire de l'Agglomération d'Orléans.

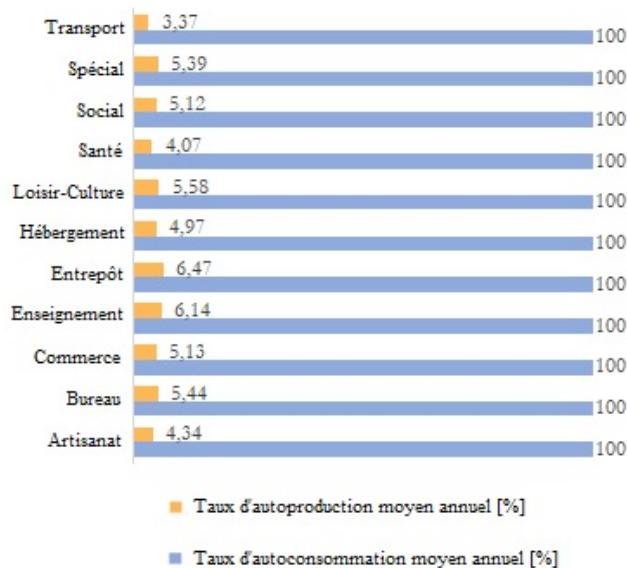


Figure 87: Taux d'autoproduction et d'autoconsommation moyens annuels par catégorie de construction – Autoconsommation maximale (source : rapport de Maryam Sadighi)

Les deux types de potentiels sont également comparés en termes économiques via le Taux de Rentabilité Interne (TRI).

La comparaison de l'indicateur TRI est illustrée par la Figure 88.

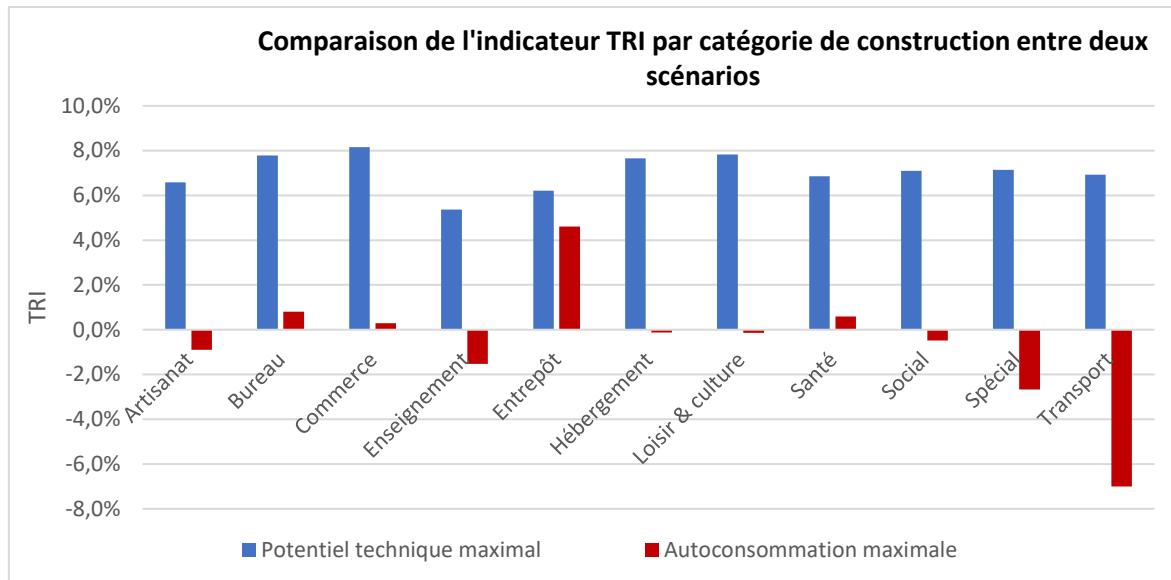


Figure 88: Comparaison de l'indicateur TRI par catégorie de construction entre deux scénarios (source : rapport de Maryam Sadighi)

Selon cette évaluation, la plupart des installations du premier scénario (potentiel technique maximal) serait « rentable », au contraire du deuxième scénario (autoconsommation 100%) pour lequel le TRI est presque nul voire négatif. Sur la base du corps d'hypothèses retenu, seule la catégorie Entrepôt présente un TRI nettement positif pour les deux scénarios. On notera cependant que les TRI sont généralement inférieurs aux valeurs seuil exigées par la plupart des entreprises, autour de 8%. Il convient en outre de rappeler que ces résultats dépendent de nombreuses données et paramètres :

- Reconstitution du parc,
- Simulation des courbes de charge,
- Espérance de vie des systèmes photovoltaïques et horizon temporel du projet d'investissement,
- Performances et coûts (investissement, maintenance) des systèmes de production photovoltaïque,
- Prix de l'électricité,
- Tarifs de rachat de l'électricité excédentaire.

Sur la base de nos deux scénarios extrêmes voire caricaturaux, ces résultats illustrent la rentabilité économique variable selon les caractéristiques des bâtiments. La différence entre le potentiel technique et le potentiel d'autoconsommation traduit aussi l'hétérogénéité du parc qui se manifeste également au sein d'une catégorie particulière. C'est ce que montrent les paragraphes suivants, consacrés au secteur Commerces, choisi pour son taux d'autoconsommation élevé (voir Figure 86) et un taux d'autoproduction plutôt bas, avec des périodes d'activité très étendues (forte amplitude horaire, saisonnalité modérée) et des consommations importantes hors périodes d'activité.

Analyse de la catégorie Commerces

L'ensemble des figures et analyses qui suivent se rapporte au scénario « Potentiel technique maximal » pour les bâtiments de la catégorie de construction Commerces

La Figure 89 présente la distribution des effectifs de bâtiments de commerce par tranche de taux d'autoconsommation. Même si la plupart se trouvent dans les tranches entre 70 % et 90 %, il faut noter que certains bâtiments atteignent un taux d'autoconsommation entre 96 % et 100 %, même dans la configuration favorisant l'installation maximale qui est seulement limitée par la surface accessible du toit. La valeur moyenne de 85 % cache donc une certaine hétérogénéité des situations.

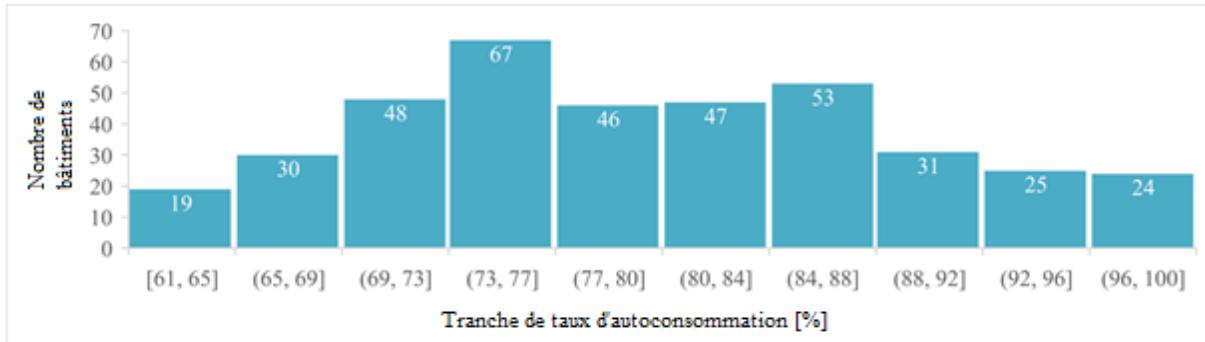


Figure 89: Analyse de la catégorie commerce – nombre de bâtiments par tranche de taux d'autoconsommation (source : rapport de Maryam Sadighi)

La distribution du taux d'autoproduction (voir Figure 90) est complètement différente de celle du taux d'autoconsommation. Les bâtiments de commerce ont un taux d'autoproduction autour de 30 % à 45 %, avec une concentration de plus en plus forte dans les dernières tranches.

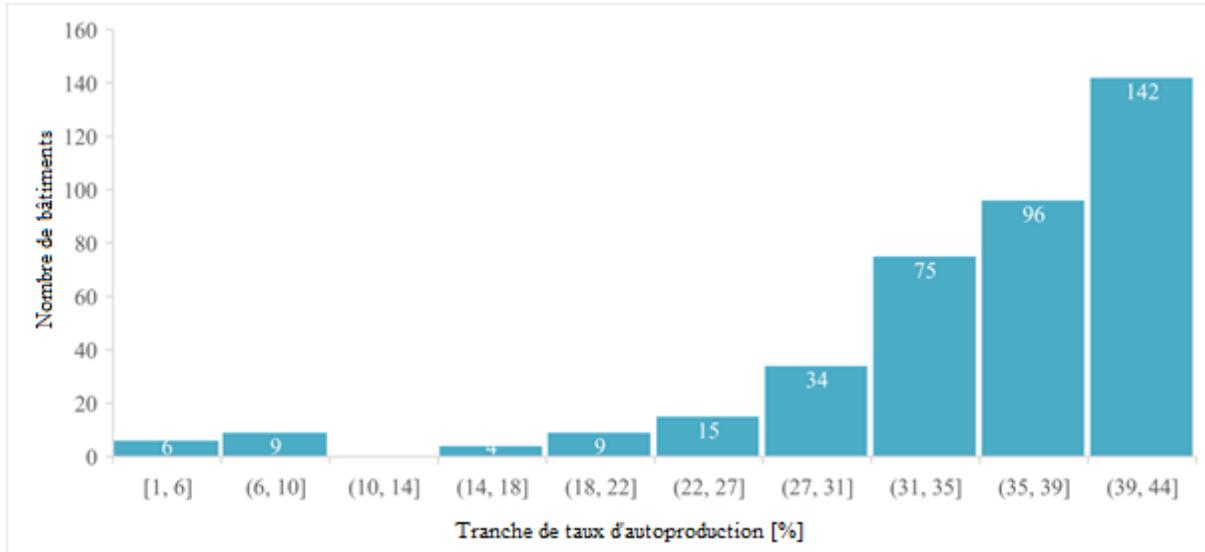


Figure 90: Analyse de la catégorie commerce – nombre de bâtiments par tranche de taux d'autoproduction (source : rapport de Maryam Sadighi)

Ces observations traduisent une diversité du rapport entre la surface de toit accessible et la demande d'électricité de chaque bâtiment.

La distribution des effectifs par tranche de TRI (voir Figure 91) reflète également la disparité de la population reconstituée. Certains bâtiments présentent en effet des TRI remarquablement élevés.

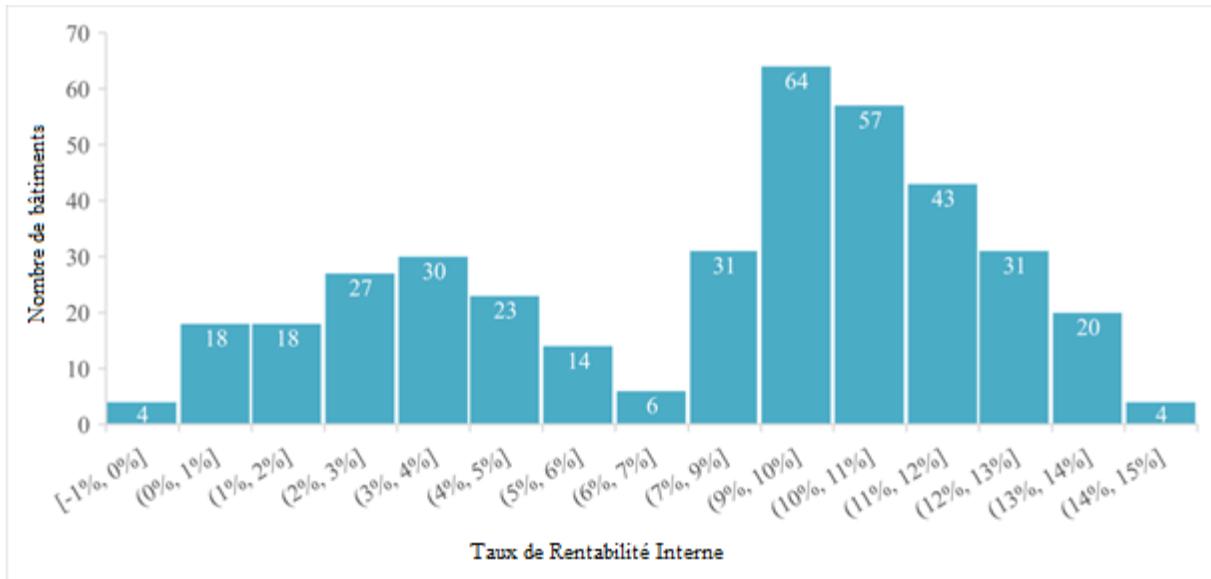


Figure 91: Analyse de la catégorie Commerces – nombre de bâtiments par tranche de TRI (source : rapport de Maryam Sadighi)

Ces trois graphes illustrent comment l'hétérogénéité peut amener à concevoir une politique énergétique différenciée : la saturation systématique en panneaux photovoltaïques n'est pas nécessairement la solution la plus pertinente du point de vue économique, du moins si l'on considère l'autoconsommation individuelle. Ces études mériteraient d'être prolongées et approfondies en abordant le cas du stockage et celui de l'autoconsommation collective, qui n'ont été qu'ébauchés dans le cadre du stage.

En l'état actuel des données disponibles, il ne semble pas raisonnable d'exploiter ces résultats à des fins de ciblage de bâtiments précis pour le déploiement de politiques énergétiques. Il faudrait pour cela fiabiliser à l'échelle de chaque bâtiment l'attribution de caractéristiques déterminantes (date de construction, vecteur énergétique). A cette condition, le ciblage des bâtiments présentant les TRI et les taux d'autoconsommation les plus élevés permettrait d'envisager une véritable planification énergétique tenant compte des réalités locales.

VI. Conclusion et Perspectives

L'efficacité énergétique et la décarbonation des usages de l'énergie dans le secteur du bâtiment constituent un enjeu stratégique dans le cadre de la transition écologique en France. En 2019, le parc de bâtiments français, incluant le secteur résidentiel et le secteur tertiaire, représente 45% de la consommation finale d'énergie et 21% des émissions directes de CO₂ du territoire métropolitain français.

La consommation d'énergie des bâtiments du secteur tertiaire et ses déterminants sont très peu documentés. Elle correspond pourtant désormais à 17% de la consommation d'énergie finale française, à la suite à la tertiarisation de l'économie du pays. La méconnaissance de la consommation d'énergie du tertiaire et de ses déterminants a deux explications principales.

La première tient à la difficulté de cerner précisément les contours et la nature du secteur tertiaire, car ce secteur est souvent défini par « complémentarité » aux secteurs primaire et secondaire. Cette difficulté trouve une solution acceptable à défaut d'être élégante via l'énumération des activités économiques et sociales qu'on rattache au secteur tertiaire.

La seconde, directement liée à la précédente, tient à l'extrême hétérogénéité du secteur, qui s'exprime aussi en demande d'énergie :

- hétérogénéité des activités, dont nature et rythmes (cycles d'activité),
- hétérogénéité des bâtiments, des usages d'énergie et des systèmes,
- hétérogénéité de la répartition spatiale des bâtiments et des conditions climatiques.

La prise en compte de cette hétérogénéité est un complément utile à la conception et au déploiement des politiques d'efficacité énergétique, de même qu'à la planification ou la prospective énergétique. Un parc supposé homogène serait très peu réaliste, or l'hétérogénéité du parc est, à l'heure actuelle, omise par une représentation agrégée. Les données disponibles permettent au mieux de représenter le parc de bâtiments sous la forme de segments des surfaces chauffées, classés par types d'activité et par énergie de chauffage principale. La consommation d'énergie s'établit alors à partir de ratios établis statistiquement à partir d'enquêtes. Ce type d'approche est un premier pas vers une stratégie visant d'abord les cibles prioritaires, appelant des actions et des efforts spécifiques.

Récemment, la croissance de la quantité et la qualité des données en accès libre ont ouvert de nouvelles possibilités pour représenter le parc de bâtiments du tertiaire tenant compte de son hétérogénéité.

Dans ce contexte, nous avons engagé les travaux pour bâtir une méthode de reconstitution du parc sous la forme d'une collection de bâtiments dont les caractéristiques énergétiques sont définies. Cette méthode, qui repose principalement sur des données communément accessibles, a trois mérites principaux :

- Elle permet de rendre compte de l'hétérogénéité du parc
- Elle permet une reconstitution sur n'importe quel territoire de France métropolitaine, de l'échelle de la commune jusqu'à l'échelle nationale.
- Elle ouvre la voie à une modélisation techno-explicite de la demande d'énergie.

La méthode comporte cinq étapes allant de la collecte de données jusqu'à la caractérisation énergétique des bâtiments, des systèmes et des occupants. L'hétérogénéité est prise en compte dès que la surface des bâtiments (référencés dans le SIG) est déterminée. A cette étape, la diversité du parc en termes de morphologie et de répartition spatiale des bâtiments, ainsi que d'activités économiques d'occupation est

déjà représentée. L'évaluation des surfaces est une étape-clé, de premier ordre : elle dimensionne le besoin.

Une fois la structure de base du parc formée, les bâtiments sont caractérisés individuellement selon différentes méthodes et données statistiques. La caractérisation thermique de chaque bâtiment et des systèmes énergétiques se base sur ses attributs qui sont uniques. Plutôt qu'un parc reflet exact, ou « jumeau numérique », du parc réel, notre méthode vise à reconstituer un parc homologue. Faute de données individuelles, un certain nombre de caractéristiques des bâtiments sont en effet attribuées via des approches statistiques. Il n'est donc pas possible de garantir leur exactitude au niveau individuel et c'est la fidélité à l'échelle d'une population qui est visée.

La méthode élaborée constitue une avancée pour la définition et l'accompagnement de la mise en œuvre des politiques énergétiques par l'Etat, comme par les collectivités territoriales et les acteurs privés. Il devient désormais envisageable de qualifier et quantifier les impacts des politiques énergétiques à grande échelle, en tenant compte des spécificités des territoires : cibles prioritaires selon la catégorie de construction, la taille, la date de construction, la localisation, ...

Deux exemples d'application ont permis d'illustrer l'approche.

- Il s'agit d'abord d'une évaluation des gisements d'économie d'énergie pour le chauffage en Île-de-France. Lors de cet exercice, nous avons estimé les gains d'efficacité énergétique et les économies résultant de la rénovation thermique et du changement de systèmes de chauffage de l'ensemble des bâtiments existants du parc tertiaire francilien.
- La deuxième étude a porté sur l'évaluation des potentiels d'autoconsommation (individuelle) d'électricité produite via des panneaux photovoltaïques installés sur le toit des bâtiments dans l'Agglomération d'Orléans.

Ces études illustratives permettent de montrer les possibilités concrètement ouvertes et soulignent qu'il faut évaluer les potentiels en fonction des caractéristiques de chaque individu dans la population de bâtiments pour bien cibler les priorités.

Dans le cadre de nos travaux, de nombreuses simplifications hypothèses voire certains choix arbitraires ont dû être consentis. L'objectif premier était en effet de dérouler l'ensemble du processus qui, partant de données élémentaires disparates, aboutit à la simulation de la demande d'énergie et de la courbe de charge des bâtiments tertiaire d'un territoire quelconque. L'application actuelle de la méthode produit donc une image stylisée du parc, en raison de ces simplifications "provisoires". Dans le cas d'études portant sur un territoire particulier et clairement identifié, la collecte d'informations **in situ** pourra utilement compléter le portrait du territoire en spécifiant des singularités locales non documentées dans les sources de données statistiques utilisées.

La validation est un point très important à traiter rigoureusement. La rareté des données détaillées du secteur tertiaire limite aujourd'hui la faculté à procéder à une validation à une maille fine (ce manque de données disponibles est précisément à l'origine des présents travaux). Malgré cette difficulté, nous avons exploré certaines pistes :

- Sondage *in situ*
- Comparaisons partielles sur certains résultats du parc avec les sources alternatives disponibles
- Analyse de sensibilité

Le sondage *in situ* a pour vocation de valider les caractéristiques reconstituées via l'observation de bâtiments réels. Lors de la construction de notre méthode, nous avons réalisé un sondage *in situ* qui permet de tester, valider et éventuellement modifier certaines hypothèses et certains algorithmes. Ce

sondage a été rendu possible grâce à la géolocalisation des bâtiments. Les résultats permettent de tirer certains enseignements qui permettront par la suite d'améliorer notre méthode.

D'autre part, les résultats de simulation ont été confrontés à quelques données disponibles provenant de sources alternatives, ce qui impose de réaliser les comparaisons aux mêmes périmètres. La région Île-de-France a été choisie pour ces comparaisons. Dans un premier temps cela a porté sur l'évaluation des surfaces, dans un second temps sur la consommation énergétique. Ce choix est justifié par l'existence de données issues d'autres sources, ainsi que par l'importance du parc francilien en termes de surface. A cette occasion, nous avons également effectué une comparaison des différentes évaluations de surface du parc des bureaux de Paris. Les comparaisons permettent de valider certains ordres de grandeurs des données agrégées de notre parc reconstitué. Elles nous ont permis de prendre du recul par rapport à nos hypothèses et d'ouvrir des pistes d'analyses de sensibilité.

L'analyse de la méthode et la comparaison aux sources externes disponibles permettent d'évaluer qualitativement le niveau de confiance que l'on peut accorder aux hypothèses formulées. Dans le Tableau 47, nous attribuons un niveau de confiance à chaque aspect traité lors des étapes de reconstitution. Un niveau de confiance plus fort est attribué lorsque les résultats issus des choix ont pu être comparés à d'autres sources. Plus les comparaisons sont nombreuses, plus le niveau de confiance est élevé. Symétriquement, nous attribuons un niveau plus faible aux aspects peu documentés (à notre échelle), ou qui emploient des données de faible qualité en particulier les sites multi-bâtiments, les sièges sociaux ou encore les datacenters. Les comparaisons de données agrégées à grande échelle permettent difficilement de valider chacune des hypothèses. Le niveau de confiance reste donc indicatif et qualitatif.

| Grande étape | Problématiques principales | Traitement |
|---|---|--|
| Identification des bâtiments et estimation des surfaces | Identification des bâtiments | Distribution des emplois des établissements d'activité tertiaire (SIRENE) aux bâtiments SIG (BDTOPO) via les liens Etablissement-Adresse-Bâti |
| | Attribution de la catégorie de construction | Attribution d'une catégorie de construction via le code APE majoritaire en termes de surfaces chauffées estimées |
| | Estimation des surfaces | Réconciliation des définitions de surface et établissement d'une méthode employant à la fois l'estimation via les données SIG, ainsi que l'estimation via le nombre d'emplois et les ratios surface par emploi (CEREN) |
| | Bâtiment mixte résidentiel-tertiaire | Détection de bâtiment mixte résidentiel-tertiaire via une approche probabiliste en comparant les surfaces estimées |
| | Sièges sociaux | Attribution du caractère "siège social" aux bâtiments abritant les établissements, et prise en compte des activités de bureaux des sièges sociaux des établissements industriels |
| | Sites multi-bâtiments | Traitements spécifiques concernant les sites multi-bâtiments (par exemple : campus universitaire, hôpitaux, ...) |
| Caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments | Distribution de la date de construction | Distribution de la date de construction avec les données issues des permis de construire (SITADEL) |
| | Distribution de la date et la nature des derniers travaux de rénovation | Distribution de la date et de la nature des derniers travaux de rénovation avec les statistiques des enquêtes d'EDF |
| | Distribution du taux de vitrage | Distribution du taux de vitrage avec les statistiques des enquêtes d'EDF |
| | Calcul de la surface mitoyenne et la surface déperditive | Calcul de la surface mitoyenne et de la surface déperditive avec les données SIG (BDTOPO) |
| | Estimation de la forme et de la surface de toiture | Distribution de la forme du toit avec statistiques des enquêtes d'EDF, et estimation de la surface de toiture avec les données SIG (BDTOPO) |
| | Calcul des masques solaires | Calcul des masques solaires avec les données SIG (BDTOPO) |

| | | |
|--|---|--|
| | Distribution des coefficients de transfert thermique U et du débit d'infiltration | Distribution des coefficients de transfert thermique U et du débit d'infiltrations en fonction de la date de construction et d'éventuelles rénovations selon les RT |
| Enrichissement des données des systèmes énergétiques | Distribution des sources d'énergie | Distribution des sources d'énergie par usage, commençant par le chauffage, puis la climatisation, l'ECS et la cuisson |
| | Chauffage | <ul style="list-style-type: none"> Attribution du type de système, la date d'installation, du rendement et des consignes Dimensionnement de la puissance |
| | Climatisation | <ul style="list-style-type: none"> Estimation de la surface climatisée Attribution du type de système, de la date d'installation, du rendement et des consignes Dimensionnement de la puissance |
| | Ventilation | <ul style="list-style-type: none"> Attribution du type de système et des consignes |
| | Eau Chaude Sanitaire (ECS) | <ul style="list-style-type: none"> Attribution du type de système, du rendement et des consignes |
| | Cuisson | <ul style="list-style-type: none"> Attribution d'une consommation unitaire |
| | Eclairage | <ul style="list-style-type: none"> Attribution du type de système, de la date d'installation, du rendement et des consignes Dimensionnement de la puissance |
| | Spécifiques et auxiliaires | <ul style="list-style-type: none"> Attribution des consignes Dimensionnement de la puissance selon les ratios issus des statistiques du CEREN |
| | Datacenter | <ul style="list-style-type: none"> Estimation des surfaces occupées par les datacenters Dimensionnement de la puissance Représentation par un bâtiment fictif |
| Caractérisation des profils d'occupation | Simulation des cycles d'activité | Simulation de la présence des occupants sur une période d'un an, au pas de temps horaire |

Confiance forte

Efforts importants fournis pour croiser le maximum de données

Confiance acceptable

Confiance moyenne

Hypothèses établies sur un échantillon réduit

Confiance faible

Données retenues pour avancer dans la méthode mais sans source statistiquement fiable

Confiance très faible

Travail restant à faire

Tableau 47: Niveau de confiance des étapes de la reconstitution

Rappelons que l'objectif premier de nos travaux consistait à **dérouler l'ensemble du processus** de la reconstitution du parc. En conséquence, plusieurs hypothèses et paramètres de notre méthode méritent des travaux d'approfondissement dans l'avenir.

Comme cette thèse représente une première tentative de prise en compte de l'hétérogénéité du parc de bâtiments du secteur tertiaire en France à une maille fine (à la fois géographique et économique), les perspectives d'amélioration sont nombreuses.

Premièrement, nous pourrons améliorer la fiabilité des processus de reconstitution, en s'appuyant sur des études approfondies sur certains sujets, sur des sondages in situ ou encore s'il y a une amélioration de la qualité et la quantité des données en accès libre. Nous pouvons distinguer ces potentiels selon les étapes de la reconstitution du parc :

- Dans l'étape d'identification des bâtiments et d'estimation des surfaces, nous pourrons approfondir les pratiques d'implantation des emplois dans les configurations complexes telles que les sièges sociaux et les sites multi-bâtiments.
- Concernant la caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments, il faudra actualiser les données statistiques utilisées, telles que le taux de vitrage et les travaux de rénovation, et réaliser des sondages in situ afin d'améliorer la fiabilité de ces processus.
- L'étape d'enrichissement des données des systèmes énergétiques qui comporte à l'heure actuelle le plus de lacunes, pourra bénéficier des travaux d'acteurs comme l'Institut de Recherche et Développement Efficacity et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).
- La caractérisation des profils d'occupation mérite un examen approfondi sur l'emploi du temps et le taux de vacance pour chacun des types d'activités économiques.

Avec l'enrichissement et l'ouverture progressive des bases de données, il devient raisonnable d'envisager une progression continue de la connaissance du parc. Cette piste commence à se concrétiser d'ores et déjà avec les mises à jour récentes des données que nous utilisons, par exemple :

- la version 3.0 de BDTOPO qui propose une description améliorée de l'usage des bâtiments (sans la description de l'occupation) par rapport à la version 2.0 et elle devrait être librement accessible à compter de 2021. Pour l'instant, la qualité des données de cette version n'est pas homogène selon la zone géographique, mais elle devrait s'améliorer au fur et à mesure des mises à jour. A terme, ces données permettront par exemple de confronter et d'améliorer notre distribution des emplois aux bâtiments.
- la publication de la nouvelle version des données locales de l'énergie en 2020, qui propose désormais les données de la consommation énergétique à la maille de l'adresse. Cette version permettra d'améliorer l'attribution des sources d'énergie, et en conséquence la distribution des systèmes énergétiques.

Dans plusieurs processus de la caractérisation des bâtiments et des systèmes, nous avons employé les données statistiques des enquêtes d'EDF réalisées entre 2008 et 2014, déjà anciennes. Il est donc souhaitable que soient réalisées à l'avenir des enquêtes régulières sur le secteur tertiaire, comme celles du secteur résidentiel telles que l'enquête Phébus (Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et USages de l'énergie) et l'enquête OPEN (Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement). Elles permettront de centraliser les connaissances communes et d'améliorer la caractérisation du parc, ainsi que de tenir compte de ses évolutions les plus récentes (exemple : la popularisation de l'éclairage par LED).

Deuxièmement, il faut améliorer la représentation techno-explicite de certains usages, notamment la ventilation, l'ECS, les usages spécifiques et les auxiliaires. Ceci consiste à introduire (pour les usages

décrits par les ratios) des systèmes avec le dimensionnement en puissance, et un rendement lié au type de système (voire un rendement variable en fonction de la charge). Néanmoins, les données disponibles concernant ces usages sont à l'heure très rares et disparates : il sera donc inévitable de faire des hypothèses fortes nécessitant des validations.

Pour ce qui concerne l'outil de simulation employé, la version de SmartE utilisée dans notre thèse est basée sur une représentation monozone du bâtiment. Ceci présente d'importantes limites et notamment l'impossibilité de prendre en compte les différences d'intensité d'usage entre parties d'un même bâtiment, comme c'est par exemple le cas lorsqu'elles sont affectées à des activités de nature différente (commerce et bureaux par exemple), ou d'usages spécifiques (datacenter dans un bâtiment de bureaux). Des travaux sont en cours de réalisation afin de passer d'une représentation monozone à une représentation bizona. A terme, il serait possible que cet outil puisse permettre de représenter un bâtiment en multizones.

Comme notre méthode permet de représenter la coexistence de multiples activités au sein d'un même bâtiment, une simulation énergétique multizone semble envisageable. Cette perspective suppose cependant que soit définie une stratégie de zonage qui conserve des temps de calcul acceptables, puisqu'il faut traiter de grands effectifs de bâtiments. Les progrès réguliers touchant le matériel informatique pourraient permettre de lever une partie de ces contraintes à l'avenir.

Enfin, il est envisageable d'élargir le périmètre du modèle de parc. Dans ce travail, nous avons abordé la mixité entre le résidentiel et le tertiaire. La prise en compte de ce couplage permettrait de réconcilier les modèles de parc des deux secteurs, voire représenter tout le parc de bâtiments sous un seul et unique modèle. Cette réconciliation permettrait alors d'établir des bilans énergétiques et des prospectives plus cohérents, et de faciliter la conception des politiques énergétiques territoriales pour le secteur du bâtiment. Le champ des applications ne se limite d'ailleurs pas aux consommations d'énergie et peut être étendu aux émissions de gaz à effet de serre et autres impacts environnementaux.

VII. Bibliographie

- [1] « Citepa - Données et expertise Air & Climat », *Citepa*. <https://www.citepa.org/fr/> (consulté le oct. 11, 2020).
- [2] « Service de la donnée et des études statistiques (SDES) du ministère de la Transition écologique et solidaire ». <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/accueil.html> (consulté le août 21, 2018).
- [3] A. T. Booth, R. Choudhary, et D. J. Spiegelhalter, « Handling uncertainty in housing stock models », *Build. Environ.*, vol. 48, p. 35-47, févr. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.016.
- [4] A. G. B. Fisher, « Production, Primary, Secondary and Tertiary », *Econ. Rec.*, vol. 15, n° 1, p. 24-38, 1939, doi: 10.1111/j.1475-4932.1939.tb01015.x.
- [5] C. Clark, *The conditions of economic progress*. Macmillan and Co. Limited, London, 1940.
- [6] J. Fourastié, *Le grand espoir du XXe siècle: progrès technique, progrès économique, progrès social*. Presses universitaires de France, 1950.
- [7] INSEE, « Définition - Secteur tertiaire | INSEE ». <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1584> (consulté le juill. 30, 2018).
- [8] Centre d'étude et de recherches économique sur l'énergie - France, « CEREN ». <https://www.ceren.fr/> (consulté le mai 14, 2018).
- [9] Energies Demain SARL, « Suivi de l'impact énergie-climat des secteurs résidentiel et tertiaire en région Centre », 2011.
- [10] S. A. Gabriel, A. S. Kydes, et P. Whitman, « The National Energy Modeling System: A Large-Scale Energy-Economic Equilibrium Model », *Oper. Res.*, vol. 49, n° 1, p. 14-25, févr. 2001, doi: 10.1287/opre.49.1.14.11195.
- [11] U.S. Energy Information Administration (EIA), « Commercial Demand Module of the National Energy Modeling System: Model Documentation », 2017, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.eia.gov/outlooks/aoe/nems/documentation/commercial/pdf/m066\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aoe/nems/documentation/commercial/pdf/m066(2017).pdf).
- [12] U.S. Department of Energy, « NEMS Documentation », *U.S. Energy Information Administration (EIA) - Sector*. <https://www.eia.gov/outlooks/aoe/nems/documentation/> (consulté le août 23, 2018).
- [13] J. Michaels, « Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS) », *U.S. Energy Information Administration (EIA)*. <https://www.eia.gov/consumption/commercial/about.php> (consulté le mai 11, 2018).
- [14] « How were buildings selected for the 2018 CBECS? » <https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2018/methodology/sampling.php> (consulté le sept. 22, 2020).
- [15] « Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS) - U.S. Energy Information Administration (EIA) ». <https://www.eia.gov/consumption/commercial/building-type-definitions.php> (consulté le sept. 22, 2020).
- [16] U. Ali, M. H. Shamsi, C. Hoare, E. Mangina, et J. O'Donnell, « A data-driven approach for multi-scale building archetypes development », *Energy Build.*, vol. 202, p. 109364, nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109364.
- [17] SRCAE, « Schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie - Île-de-France », 2012. http://www.srcae-idf.fr/IMG/pdf/SRCAE_-_Ile-de-France_version_decembre_2012_vdefinitive_avec_couverture_-_v20-12-2012_cle0b1cdf.pdf (consulté le sept. 22, 2020).
- [18] S. Azhar, M. Khalfan, et T. Maqsood, « Building information modelling (BIM): now and beyond », *Constr. Econ. Build.*, vol. 12, n° 4, p. 15-28, 2012, doi: 10.5130/AJCEB.v12i4.3032.
- [19] R. Volk, J. Stengel, et F. Schultmann, « Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs », *Autom. Constr.*, vol. 38, p. 109-127, mars 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- [20] Z. Ma et Y. Ren, « Integrated Application of BIM and GIS: An Overview », *Procedia Eng.*, vol. 196, p. 1072-1079, janv. 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.08.064.

- [21] P. Steadman, S. Evans, R. Liddiard, D. Godoy-Shimizu, P. Ruyssevelt, et D. Humphrey, « Building stock energy modelling in the UK: the 3DStock method and the London Building Stock Model », *Build. Cities*, vol. 1, n° 1, Art. n° 1, mai 2020, doi: 10.5334/bc.52.
- [22] T. Berthou, B. Duplessis, P. Rivière, P. Stabat, D. Casetta, et D. Marchio, « SMART-E: A TOOL FOR ENERGY DEMAND SIMULATION AND OPTIMIZATION AT THE CITY SCALE », déc. 2015.
- [23] T. Berthou, « Développement de modèles de bâtiment pour la prévision de charge de climatisation et l'élaboration de stratégies d'optimisation énergétique et d'effacement », These de doctorat, Paris, ENMP, 2013.
- [24] Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) - France, « SIRENE ». <https://www.sirene.fr/sirene/public/accueil> (consulté le mai 14, 2018).
- [25] Ministère de la transition écologique et solidaire - France, « SITADEL », 2015 1975. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/th/logement-construction-2.html> (consulté le mai 14, 2018).
- [26] Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) - France, « BDTOPO® ». <http://professionnels.ign.fr/bdtopo> (consulté le mai 14, 2018).
- [27] « Open Data | Enedis ». <https://www.enedis.fr/open-data> (consulté le sept. 22, 2020).
- [28] « Accueil — Open Data GRDF ». <https://opendata.grdf.fr/pages/accueil/> (consulté le sept. 22, 2020).
- [29] « Données locales d'énergie - data.gouv.fr ». [/fr/datasets/donnees-locales-denergie/](https://data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-locales-denergie/) (consulté le sept. 22, 2020).
- [30] C. Quest, « Géocodage de la base SIRENE », *Christian Quest*, sept. 15, 2017. <https://medium.com/@cq94/g%C3%A9ocodage-de-la-base-sirene-2f0e14e87a8d> (consulté le août 23, 2018).
- [31] « Fiche du formulaire n°13409*06 ». <https://www.formulaires.modernisation.gouv.fr/gf/showFormulaireSignaletiqueConsulter.do?numCerfa=13409> (consulté le août 21, 2018).
- [32] « Légifrance, le service public de la diffusion du droit ». <https://www.legifrance.gouv.fr/> (consulté le août 21, 2018).
- [33] Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) - France, « ADRESSE PREMIUM® ». <http://professionnels.ign.fr/adressepremium> (consulté le mai 14, 2018).
- [34] V. Marty-Jourjon, T. Berthou, B. Duplessis, et P. Stabat, « Proposition d'une méthode générique d'estimation de parcs de bâtiments de bureaux pour la simulation énergétique », Bordeaux, France, mai 2018, Consulté le: août 26, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01981407>.
- [35] « Base d'Adresses Nationale Ouverte - BANO - data.gouv.fr ». [/fr/datasets/base-d-adresses-nationale-ouverte-bano/](https://data.gouv.fr/fr/datasets/base-d-adresses-nationale-ouverte-bano/) (consulté le sept. 08, 2019).
- [36] L. Frayssinet *et al.*, « Incertitude de simulation à l'échelle du quartier : comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité », Bordeaux, France, 2018, Consulté le: oct. 21, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01842414>.
- [37] A. Billy, B. Messager, D. Poirot, et R. Dieudonne, « Observatoire des coûts de la construction dans le secteur médico-social », ANAP.
- [38] V. Fouchier, « Des fortes densités urbaines : les villes nouvelles dans l'espace métropolitain », thesis, Paris 8, 1997.
- [39] ADEME - Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, « Etudes sur les sites commerciaux à haute efficacité énergétique ». févr. 26, 2010, Consulté le: août 23, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etude-sur-les-sites-commerciaux-a-haute-efficacite-energetique.pdf>.
- [40] « `scipy.stats.gaussian_kde` — SciPy v1.3.0 Reference Guide ». https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.html (consulté le août 26, 2019).
- [41] « Les parois vitrées dans la RT2012 ? – Les Réglementations Thermiques et Environnementales ». <https://re2018.fr/accueil/reglementations-et-labels/rt2012/parois-vitrees-rt2012/> (consulté le oct. 25, 2020).

- [42] D. CLEMENT, « RT 2012 et impact de la surface des parois vitrées », Etude. Consulté le: oct. 25, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://conseils.xpair.com/actualite_experts/rt2012-et-impact-surface-parois-vitrees.htm.
- [43] *Arrêté du 17 octobre 2012 modifiant la méthode de calcul 3CL-DPE introduite par l'arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine - Légifrance.* .
- [44] E. Garreau, T. Berthou, B. Duplessis, V. Partenay, et D. Marchio, « Urban-scale energy simulation: A development of a novel method for parsimonious modelling -The example of solar shading model calculation », présenté à BS2019, sept. 2019, Consulté le: oct. 23, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-02393146>.
- [45] F. DE CARLAN, T. GUIOT, J.-C. LEONARD, et G. CASTAGNA, « Data Center - État des lieux », Efficacity, 2017. [En ligne]. Disponible sur: https://www.efficacity.com/wp-content/uploads/2017/12/170407_Rapport-Datacenter.pdf.
- [46] G. C. Groff, « Histoire des pompes à chaleur. Quelles utilisations et par qui ? », *REHVA J.*, mars 2010, [En ligne]. Disponible sur: <https://aicvf.org/comite-international/files/2010/09/histoire-des-pompes-a-chaleur-mars-2010.pdf>.
- [47] « Évaluations du rendement des chaudières à gaz, à fioul et à bois ». https://www.desenfans.com/evaluation_rendement_chaudieres.html (consulté le déc. 17, 2020).
- [48] « Le vrai rendement des pompes à chaleur ! », *Acteurs Durable*, mars 24, 2010. <https://www.acteurdurable.org/realite-des-pompes-a-chaleur/> (consulté le déc. 17, 2020).
- [49] « Charges thermiques internes pour les bureaux », *Energie Plus Le Site*, sept. 25, 2007. <https://energieplus-lesite.be/theories/bilan-thermique44/charges-thermiques-internes-pour-les-bureaux/> (consulté le déc. 17, 2020).
- [50] « Machine frigorifique à ab/adsorption », *Energie Plus Le Site*, sept. 25, 2007. <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-ab-adsorption/> (consulté le déc. 17, 2020).
- [51] « L'eau chaude sanitaire », *ADEME*. <https://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire> (consulté le nov. 26, 2020).
- [52] « Consommation d'eau chaude sanitaire », *Energie Plus Le Site*, sept. 25, 2007. <https://energieplus-lesite.be/donnees/consommations2/consommation-d-eau-chaude-sanitaire/> (consulté le nov. 26, 2020).
- [53] « Led know how ». <http://led-know-how.ch/fr/> (consulté le nov. 26, 2020).
- [54] « Tableau rendement lumineux », *Led-MAG | Le blog informatif dédié à l'éclairage LED*. <https://www.led-flash.fr/blog/changement-dampoule-equivalence/tableau-rendement-lumineux/> (consulté le nov. 26, 2020).
- [55] « Fluorescence », *le guide de l'éclairage*, juin 18, 2013. <https://leclairage.fr/fluorescence/> (consulté le nov. 26, 2020).
- [56] R. CADIERGUES, « Les installations d'éclairage: règles et méthodes », *XPair*. https://conseils.xpair.com/actualite_experts/installations-eclairage-regles-methodes.htm (consulté le nov. 26, 2020).
- [57] E. Standards, « BS EN 12464-1:2011 Light and lighting. Lighting of work places Indoor work places », <https://www.en-standard.eu>. <https://www.en-standard.eu/bs-en-12464-1-2011-light-and-lighting.-lighting-of-work-places-indoor-work-places/> (consulté le déc. 17, 2020).
- [58] « Energie nécessaire à la production d'un repas », *Energie Plus Le Site*, sept. 25, 2007. <https://energieplus-lesite.be/donnees/cuisine-collective3/energie-necessaire-a-la-production-d-un-repas/> (consulté le nov. 26, 2020).
- [59] É. Vorger, « Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment », These de doctorat, Paris, ENMP, 2014.
- [60] « Enquête Emploi du temps | Insee ». <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1224> (consulté le nov. 27, 2020).
- [61] « Comment choisir l'emplacement idéal pour un restaurant ? », *Dynamique-Mag.com*, avr. 06, 2018. <https://www.dynamique-mag.com/article/comment-choisir-local-restaurant.5021> (consulté le nov. 26, 2020).

- [62] D. Marchio *et al.*, « Quelles solutions pour des bâtiments de bureaux climatisés à moins de 100 kWh/m²/an ? », CSTB - ARMINES - ALTO, DDD/PEB-05.044 R, 2005.
- [63] « Tableau de bord Conjoncture : Île-de-France | Insee ». <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2109644>.
- [64] Apur, « En Ile-de-France, 39 pôles d'emploi structurent l'économie régionale », *Apur*, janv. 22, 2014. <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ile-france-39-poles-demploi-structurent-leconomie-regionale> (consulté le nov. 16, 2020).
- [65] D. Île-de-France, « BatiSIG & Batistato : mise à jour via l'intégration de la partie « tertiaire » », juill. 31, 2013. <http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/batisig-batistato-mise-a-jour-via-l-integration-de-a4334.html> (consulté le sept. 22, 2020).
- [66] « Bilan du plan climat énergie de Paris », Marie de Paris, 2014. Consulté le: nov. 16, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.apc-paris.com/publication/bilan-plan-climat-energie-paris-2004-2014>.
- [67] « Emploi au lieu de travail en 2017 – Emploi-Activité en 2017 | Insee ». <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4515506?sommaire=4516095> (consulté le déc. 03, 2020).
- [68] « Meteonorm », *Meteonorm (en)*. <https://meteonorm.com/en/> (consulté le nov. 28, 2020).
- [69] « Évaluer la consommation de la climatisation », *Energie Plus Le Site*, sept. 25, 2007. <https://energieplus-lesite.be/evaluer/climatisation5/evaluer-la-consommation-de-la-climatisation/> (consulté le déc. 21, 2020).
- [70] I. M. Sobol', « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates », *Math. Comput. Simul.*, vol. 55, n° 1, p. 271-280, févr. 2001, doi: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6.
- [71] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, et S. Tarantola, « Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index », *Comput. Phys. Commun.*, vol. 181, n° 2, p. 259-270, févr. 2010, doi: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.
- [72] « Climatologie de l'année 2018 à Paris-Montsouris - Infoclimat ». <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2018/paris-montsouris/valeurs/07156.html> (consulté le déc. 03, 2020).
- [73] « La rénovation énergétique des bâtiments de bureaux climatisés ». <http://www.energies-avenir.fr/page/renovation-bureaux-climatisees-83> (consulté le déc. 12, 2020).
- [74] « Comment calculer votre bilan thermique », *ABC CLIM*. <https://www.abclim.net/calcul-bilan-thermique.html> (consulté le déc. 10, 2020).
- [75] « Systèmes d'autoconsommation », *Ministère de la Transition écologique*. <https://www.ecologie.gouv.fr/systemes-dautoconsommation> (consulté le déc. 12, 2020).
- [76] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, et J. Palm, « Photovoltaic self-consumption in buildings: A review », *Appl. Energy*, vol. 142, p. 80-94, mars 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [77] Comité National pour le Développement du Bois - CNDB, « CNDB - Etudes d'observation des coûts de construction ». <http://www.cndb.org/?p=telechargements> (consulté le mai 14, 2018).
- [78] RDB architectes, « RDB architectes - Portfolio », *Ordre des architectes*, sept. 03, 2010. <https://www.architectes-pour-tous.fr/architectes-pour-tous/agence-rdb-architectes> (consulté le mai 14, 2018).
- [79] Bourgogne Bâtiment Durable, « Dossiers techniques - Bourgogne Bâtiment Durable ». <http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/observation/dossiers-techniques.html> (consulté le mai 14, 2018).
- [80] « HOPITAL DE SANTE MENTALE - La Roche sur Foron (74), par BRIERE ARCHITECTES », *Archiliste*. <http://www.archiliste.fr/briere-architectes/hopital-de-sante-mentale-la-roche-sur-foron-74> (consulté le mai 11, 2018).
- [81] « COLLEGE ST FRANCOIS DES CORDELIERS - Seynod (74), par BRIERE ARCHITECTES », *Archiliste*. <http://www.archiliste.fr/briere-architectes/college-st-francois-des-cordeliers-seynod-74> (consulté le mai 11, 2018).

VIII. Annexes

1. Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Répartition par grand secteur de la consommation finale d'énergie en 2019 (source : [2])..... | 3 |
| Figure 2: Consommation finale d'énergie par grand secteur et par source d'énergie en 2019 (source : [2]) | 3 |
| Figure 3: Décomposition des déterminants de la demande d'énergie du secteur tertiaire | 4 |
| Figure 4: Décomposition des déterminants de la demande d'énergie du secteur tertiaire par sources d'énergie..... | 5 |
| Figure 5: Segmentation de la surface chauffée du parc de bâtiments tertiaire | 12 |
| Figure 6: Organisation des modules de NEMS (source: [11] – P.18) | 13 |
| Figure 7: Illustration de l'objectif méthodologique de la thèse | 20 |
| Figure 8: Les étapes de la reconstitution du parc | 22 |
| Figure 9: Positionnement des bases de données..... | 24 |
| Figure 10: Données sélectionnées de la base SIRENE géocodé | 25 |
| Figure 11: Données sélectionnées de la base CEREN | 26 |
| Figure 12: Données sélectionnées de la base SITADEL | 27 |
| Figure 13:Données sélectionnées des bases SIG de l'IGN - BDTOPO et Adresse Premium..... | 27 |
| Figure 14: Données sélectionnées des bases en en accès libre d'ENEDIS, de GrDF et des données locales de l'énergie..... | 28 |
| Figure 15: Les étapes de croisement des bases de données pour établir le référentiel primaire du parc (RPP) | 31 |
| Figure 16: Relations Adresse-Bâtiment-Etablissement : configurations envisagées | 34 |
| Figure 17: Comparaison des résultats des méthodes d'estimation de surface par catégorie de construction sur la commune de Nanterre..... | 38 |
| Figure 18: Comparaison des résultats des méthodes de calcul de surface par tranche SHON pour la commune de Nanterre | 39 |
| Figure 19: Exemple d'une zone multi-bâtiment - Hôpital Max Fourestier à Nanterre | 40 |
| Figure 20: Confrontation entre deux méthodes d'estimation de la surface | 41 |
| Figure 21: Pourcentage de bâtiments par catégorie de construction qui présentent des écarts sur le nombre d'étages | 45 |
| Figure 22: Test de nouvelles hypothèses sur la hauteur d'étage | 46 |
| Figure 23: comparaison des deux méthodes d'estimation de la surface pour tout l'échantillon d'Orléans | 47 |
| Figure 24: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Artisanat..... | 47 |
| Figure 25: Fonctions de distribution de la catégorie Artisanat issues d'une observation de 36 bâtiments réels | 48 |
| Figure 26: Schéma de l'étape 3 : Caractérisation thermique de l'enveloppe des bâtiments | 52 |
| Figure 27: Cumul de surface par catégorie des permis de construire entre 1975 et 2015 – exemple de Nanterre | 54 |
| Figure 28: Répartition de la surface des Bureaux selon les tranches – exemple de Nanterre | 54 |
| Figure 29: Exemple de l'estimation de la surface totale construite avant 1975 – Nanterre..... | 55 |
| Figure 30: Distribution en fonction de la période de construction de la durée écoulée depuis la dernière rénovation (jusqu'à la date de l'enquête) - ensemble des secteurs | 56 |
| Figure 31: Illustration de la méthode de détermination de la surface mitoyenne | 59 |
| Figure 32: Types de toiture basiques (source : [10 Types de toitures])..... | 60 |
| Figure 33: Consommation par usage du secteur tertiaire à l'échelle nationale (source : CEREN)..... | 62 |
| Figure 34: Schéma de l'étape 4 : Enrichissement des données des systèmes énergétiques | 64 |

| | |
|---|-----|
| Figure 35: Distribution de l'énergie de chauffage en prenant en compte la disponibilité du gaz et des réseaux de chaleur | 69 |
| Figure 36: Dimensionnement de l'éclairage | 79 |
| Figure 37: Schéma de l'étape 5 : Caractérisation des profils d'occupation | 83 |
| Figure 38: Exemple d'une courbe d'occupation journalière dans un bâtiment de bureaux..... | 86 |
| Figure 39: Exemple d'une courbe d'occupation hebdomadaire dans un bâtiment de bureaux | 87 |
| Figure 40: Exemple d'une courbe d'occupation annuelle dans un bâtiment de bureaux | 87 |
| Figure 41: Carte des parcs communaux de Nanterre, de Courbevoie et de Puteaux | 91 |
| Figure 42: Structure du parc tertiaire de Nanterre..... | 92 |
| Figure 43: Structure du parc tertiaire de Courbevoie | 92 |
| Figure 44: Structure du parc tertiaire de Puteaux | 93 |
| Figure 45: Répartition de la surface utile du parc tertiaire francilien..... | 94 |
| Figure 46: Densité d'emploi en Île-de-France (source : APUR) | 95 |
| Figure 47: Surface par catégorie de construction du parc francilien | 96 |
| Figure 48: Description des surfaces des départements de l'Île-de-France | 97 |
| Figure 49: Répartition de la surface utile du parc tertiaire francilien - Catégories Bureau, Commerce, Entrepôt et Santé | 98 |
| Figure 50: Répartition par date de construction du parc tertiaire francilien..... | 99 |
| Figure 51: Répartition par tranche de surface du parc tertiaire francilien..... | 99 |
| Figure 52: Répartition en catégorie de construction de la surface du parc tertiaire de Paris..... | 100 |
| Figure 53: Répartition par date de construction du parc parisien..... | 101 |
| Figure 54: Surface totale du parc de l'Île-de-France | 102 |
| Figure 55: Surface totale par secteur d'activité du parc de l'Île-de-France..... | 104 |
| Figure 56: Parts de marché des sources d'énergie de chauffage..... | 105 |
| Figure 57 : Surface totale estimée du parc des bureaux de Paris | 106 |
| Figure 58: Estimation de la surface des bureaux des arrondissements de Paris | 107 |
| Figure 59: Différence entre nombre d'emplois déclaré et celui au lieu de travail par arrondissement de Paris | 108 |
| Figure 60: Consommation énergétique totale du secteur tertiaire en Île-de-France..... | 110 |
| Figure 61: Cartographie de la consommation énergétique du parc tertiaire francilien | 111 |
| Figure 62: Consommation surfacique annuelle du parc tertiaire des arrondissements de Paris..... | 111 |
| Figure 63: Consommation surfacique annuelle du parc tertiaire des communes des Hauts-de-Seine | 112 |
| Figure 64: Consommation surfacique annuelle (kWh/m ²) par catégorie de construction en Île-de-France | 112 |
| Figure 65: Comparaison de la consommation annuelle par source d'énergie du parc francilien..... | 113 |
| Figure 66: Consommation par énergie et par usage du parc francilien | 113 |
| Figure 67: Comparaison de la consommation annuelle par usage (toute énergie) du parc francilien . | 114 |
| Figure 68: Consommation d'électricité par usage du parc francilien | 115 |
| Figure 69:Courbe de charge hebdomadaire d'électricité simulée du parc tertiaire la commune de Nanterre | 116 |
| Figure 70: Courbes de charge annuelle d'électricité simulée des bâtiments du parc tertiaire de la commune de Nanterre | 117 |
| Figure 71: Courbe de charge annuelle d'électricité simulée du parc tertiaire de la commune de Nanterre | 117 |
| Figure 72: Courbes de charge par usage (toute source d'énergie) en hivers de la commune de Nanterre | 118 |
| Figure 73: Courbes de charge par usage (toute source d'énergie) en été de la commune de Nanterre | 118 |
| Figure 74: Variation de la surface totale du parc tertiaire de la commune de Nanterre selon les paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité..... | 120 |

| | |
|--|-----|
| Figure 75: Comparaison des résultats de simulation des SCM – consommation totale annuelle du parc francilien..... | 124 |
| Figure 76: Comparaison des résultats de simulation des SCM –consommation annuelle de chauffage et de climatisation du parc francilien | 124 |
| Figure 77: Comparaison avant et après modification du parc - consommation totale annuelle par usage de l'Île-de-France | 129 |
| Figure 78: Comparaison avant / après modification du parc en consommation totale annuelle de chauffage et de climatisation du parc francilien..... | 130 |
| Figure 79: Comparaison avant /après modification du parc - consommation surfacique annuelle par catégorie de construction en Île-de-France pour tous usages | 131 |
| Figure 80: Comparaison avant / après modification du parc - consommation surfacique annuelle du chauffage par catégorie de construction en Île-de-France..... | 131 |
| Figure 81: Comparaison avant / après modification du parc - consommation surfacique annuelle du chauffage par date de construction en Île-de-France..... | 132 |
| Figure 82: Comparaison avant / après modification du parc - consommation surfacique annuelle du chauffage par département en Île-de-France | 132 |
| Figure 83: Illustration du calcul du taux d'autoconsommation et du taux d'autoproduction (source : [76]) | 135 |
| Figure 84: Illustration de la variation de la production photovoltaïque et des taux d'autoconsommation et d'autoproduction (source : [76])...... | 135 |
| Figure 85: Comparaison de production annuelle par catégorie de construction des panneaux photovoltaïques selon deux scénarios (source : rapport de Maryam Sadighi) | 136 |
| Figure 86: Taux d'autoproduction et d'autoconsommation moyens annuels par catégorie de construction – Potentiel technique maximal (source : rapport de Maryam Sadighi) | 137 |
| Figure 87: Taux d'autoproduction et d'autoconsommation moyens annuels par catégorie de construction – Autoconsommation maximale (source : rapport de Maryam Sadighi)..... | 137 |
| Figure 88: Comparaison de l'indicateur TRI par catégorie de construction entre deux scénarios (source : rapport de Maryam Sadighi)..... | 138 |
| Figure 89: Analyse de la catégorie commerce – nombre de bâtiments par tranche de taux d'autoconsommation (source : rapport de Maryam Sadighi) | 139 |
| Figure 90: Analyse de la catégorie commerce – nombre de bâtiments par tranche de taux d'autoproduction (source : rapport de Maryam Sadighi) | 139 |
| Figure 91: Analyse de la catégorie Commerces – nombre de bâtiments par tranche de TRI (source : rapport de Maryam Sadighi)..... | 140 |
| Figure 92: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Bureau..... | 184 |
| Figure 93: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Commerce..... | 184 |
| Figure 94: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Santé | 185 |
| Figure 95: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Social | 185 |

2. Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1: Sources de données pour la reconstitution des surfaces d'ENERTER | 14 |
| Tableau 2: Niveaux de désagrégation de la description du parc – ENERTER | 15 |
| Tableau 3: Comparaison des méthodes de représentation d'un parc de bâtiments | 18 |
| Tableau 4: Données extraites à partir des enquêtes d'EDF..... | 29 |
| Tableau 5: Effectifs retenus des tranches d'effectifs proposés dans la base de données SIRENE (source : [34]) | 32 |
| Tableau 6: Couverture d'Adresse Premium des adresses dans la base SIRENE | 32 |
| Tableau 7: Différence entre les différentes surfaces règlementaires (Source : ANAP [37]) | 36 |
| Tableau 8: Ratios SHON/SU par catégorie de construction..... | 37 |
| Tableau 9: Nombre de bâtiments par catégorie de construction dans l'échantillon d'observation | 43 |
| Tableau 10: Vérification de l'usage tertiaire via notre sondage in situ..... | 44 |
| Tableau 11: Quantification des erreurs dans les bases de données | 44 |
| Tableau 12: Comparaison du nombre d'étages estimé avec $h = 3$ m et observé - sondage in situ | 44 |
| Tableau 13: Hypothèse reformulée de la hauteur d'étage suite au sondage in situ..... | 46 |
| Tableau 14: Synthèse des hypothèses de l'étape 2..... | 51 |
| Tableau 15: Deux famille de variables descriptives de l'état thermique d'un bâtiment..... | 52 |
| Tableau 16: Présence estimée de datacenters dans différents secteurs..... | 65 |
| Tableau 17: Présence estimée d'équipements de cuisson | 66 |
| Tableau 18: Critère de convergence de la distribution des sources d'énergie de chauffage..... | 71 |
| Tableau 19: Types de systèmes de chauffage..... | 73 |
| Tableau 20: Rendement nominal des systèmes de chauffage..... | 74 |
| Tableau 21: Types de système de climatisation | 74 |
| Tableau 22: Rendement nominal des systèmes de climatisation..... | 75 |
| Tableau 23: Types de système d'ECS..... | 76 |
| Tableau 24: Rendement nominal des systèmes d'ECS | 77 |
| Tableau 25: Distribution des puisages d'ECS..... | 77 |
| Tableau 26: Rendement des systèmes d'éclairage | 78 |
| Tableau 27: Mode de régulation de l'éclairage..... | 78 |
| Tableau 28: Les utilances (source : [51]) | 79 |
| Tableau 29: Niveau d'éclairage demandé par catégorie de construction..... | 80 |
| Tableau 30: Données du CEREN sur la consommation des usages spécifiques | 81 |
| Tableau 31: Hypothèse de calcul de puissance des usages spécifiques..... | 82 |
| Tableau 32: Paramètres de la simulation de l'occupation : Heure de début du service | 84 |
| Tableau 33: Paramètres de la simulation de l'occupation : Heure de fin du service | 84 |
| Tableau 34: Paramètres de la simulation de l'occupation : Taux de présence journalière d'une semaine | 85 |
| Tableau 35: Paramètres de la simulation de l'occupation : Taux de présence mensuelle | 85 |
| Tableau 36: Nombre d'usagers par heure et par emploi | 88 |
| Tableau 37: Statistiques sur le parc tertiaire francilien de Bâtistato (source : DRIEA Île-de-France) | 103 |
| Tableau 38: Estimations de la part des emplois de bureaux pour chaque activité NAF A38 (source: [34]) | 106 |
| Tableau 39: Bornes de l'échantillonnage de l'analyse de sensibilité | 119 |
| Tableau 40: Indice de Sobol de premier ordre | 121 |
| Tableau 41: Indice de Sobol de second ordre..... | 121 |
| Tableau 42: Comparaison des données météorologiques de Paris et nos scénarios de simulation – DJU | 123 |
| Tableau 43: Comparaison des données météorologiques de Paris et nos scénarios de simulation – Température extérieure..... | 123 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 44: Quantité de travaux et changement de systèmes engendrés par notre scénario..... | 128 |
| Tableau 45: Impacts de la modification du parc sur l'isolation et le rendement des systèmes de chauffage | 128 |
| Tableau 46: Niveau d'isolation correspondant à l'ordre de grandeur de Ubat (source : ABC CLIM [74]) | 129 |
| Tableau 47: Niveau de confiance des étapes de la reconstitution | 145 |
| Tableau 48: Correspondance entre codes APE, branches et sous-branches définies par le CEREN .. | 171 |
| Tableau 49: Correspondance entre codes APE et catégories de construction | 180 |
| Tableau 50: Sources des données des ratios Surface Utile sur SHON | 183 |

3. Tableaux et figures annexes

| Branche CEREN | Sous-branche CEREN | APE | Nomenclature |
|----------------------|--|------------|---|
| Bureaux | Bureaux de l'État | 8423Z | Justice |
| Bureaux | Bureaux de l'État | 8412Z | Administration publique (tutelle) de la santé, de la formation, de la culture et des services sociaux, autre que sécurité sociale |
| Bureaux | Bureaux de l'État | 8413Z | Administration publique (tutelle) des activités économiques |
| Bureaux | Bureaux de l'État | 8425Z | Services du feu et de secours |
| Bureaux | Bureaux de l'État | 8421Z | Affaires étrangères |
| Bureaux | Bureaux de l'État | 8424Z | Activités d'ordre public et de sécurité |
| Bureaux | Bureaux des collectivités | 8411Z | Administration publique générale |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6630Z | Gestion de fonds |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6621Z | Évaluation des risques et dommages |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6622Z | Activités des agents et courtiers d'assurances |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6629Z | Autres activités auxiliaires d'assurance et de caisses de retraite |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6611Z | Administration de marchés financiers |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6612Z | Courtage de valeurs mobilières et de marchandises |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 8430C | Distribution sociale de revenus |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6530Z | Caisse de retraite |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 8430A | Activités générales de sécurité sociale |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 8430B | Gestion des retraites complémentaires |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6419Z | Autres intermédiaires monétaires |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6201Z | Programmation informatique |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6312Z | Portails Internet |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6202A | Conseil en systèmes et logiciels informatiques |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6203Z | Gestion d'installations informatiques |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6311Z | Traitements de données, hébergement et activités connexes |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6209Z | Autres activités informatiques |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6619B | Autres activités auxiliaires de services financiers, hors assurance et caisses de retraite, n.c.a. |

| | | | |
|---------|---|-------|---|
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6491Z | Crédit-bail |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6619A | Supports juridiques de gestion de patrimoine mobilier |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6430Z | Fonds de placement et entités financières similaires |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6492Z | Autre distribution de crédit |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6411Z | Activités de banque centrale |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6520Z | Réassurance |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6512Z | Autres assurances |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6511Z | Assurance vie |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6420Z | Activités des sociétés holding |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6202B | Tierce maintenance de systèmes et d'applications informatiques |
| Bureaux | Bureaux privés: banque, assurance, bureaux d'étude | 6499Z | Autres activités des services financiers, hors assurance et caisses de retraite, n.c.a. |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7010Z | Activités des sièges sociaux |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7721Z | Location et location-bail d'articles de loisirs et de sport |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7311Z | Activités des agences de publicité |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7112A | Activité des géomètres |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7120B | Analyses, essais et inspections techniques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7120A | Contrôle technique automobile |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7320Z | Études de marché et sondages |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7111Z | Activités d'architecture |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7430Z | Traduction et interprétation |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6920Z | Activités comptables |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7021Z | Conseil en relations publiques et communication |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7022Z | Conseil pour les affaires et autres conseils de gestion |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6910Z | Activités juridiques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6820A | Location de logements |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6832A | Administration d'immeubles et autres biens immobiliers |

| | | | |
|---------|---|-------|---|
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6832B | Supports juridiques de gestion de patrimoine immobilier |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7112B | Ingénierie, études techniques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7739Z | Location et location-bail d'autres machines, équipements et biens matériels n.c.a. |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7729Z | Location et location-bail d'autres biens personnels et domestiques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7734Z | Location et location-bail de matériels de transport par eau |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7722Z | Location de vidéocassettes et disques vidéo |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7731Z | Location et location-bail de machines et équipements agricoles |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7740Z | Location-bail de propriété intellectuelle et de produits similaires, à l'exception des œuvres soumises à copyright |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7711A | Location de courte durée de voitures et de véhicules automobiles légers |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7312Z | Régie publicitaire de médias |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7733Z | Location et location-bail de machines de bureau et de matériel informatique |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6831Z | Agences immobilières |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7735Z | Location et location-bail de matériels de transport aérien |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7712Z | Location et location-bail de camions |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7711B | Location de longue durée de voitures et de véhicules automobiles légers |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7490B | Activités spécialisées, scientifiques et techniques diverses |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7490A | Activité des économistes de la construction |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7410Z | Activités spécialisées de design |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7500Z | Activités vétérinaires |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7732Z | Location et location-bail de machines et équipements pour la construction |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4611Z | Intermédiaires du commerce en matières premières agricoles, animaux vivants, matières premières textiles et produits semi-finis |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6820B | Location de terrains et d'autres biens immobiliers |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5224B | Manutention non portuaire |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5224A | Manutention portuaire |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4614Z | Intermédiaires du commerce en machines, équipements industriels, navires et avions |

| | | | |
|---------|---|-------|--|
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5229A | Messagerie, fret express |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5229B | Affrètement et organisation des transports |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5320Z | Autres activités de poste et de courrier |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4612A | Centrales d'achat de carburant |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5310Z | Activités de poste dans le cadre d'une obligation de service universel |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4613Z | Intermédiaires du commerce en bois et matériaux de construction |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4617B | Autres intermédiaires du commerce en denrées, boissons et tabac |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4618Z | Intermédiaires spécialisés dans le commerce d'autres produits spécifiques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4617A | Centrales d'achat alimentaires |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4615Z | Intermédiaires du commerce en meubles, articles de ménage et quincaillerie |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4612B | Autres intermédiaires du commerce en combustibles, métaux, minéraux et produits chimiques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4619B | Autres intermédiaires du commerce en produits divers |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4619A | Centrales d'achat non alimentaires |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6190Z | Autres activités de télécommunication |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6120Z | Télécommunications sans fil |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9411Z | Activités des organisations patronales et consulaires |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9492Z | Activités des organisations politiques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9412Z | Activités des organisations professionnelles |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9499Z | Autres organisations fonctionnant par adhésion volontaire |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9420Z | Activités des syndicats de salariés |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4616Z | Intermédiaires du commerce en textiles, habillement, fourrures, chaussures et articles en cuir |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6399Z | Autres services d'information n.c.a. |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6810Z | Activités des marchands de biens immobiliers |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4110B | Promotion immobilière de bureaux |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6110Z | Télécommunications filaires |

| | | | |
|---------|---|-------|---|
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5821Z | Édition de jeux électroniques |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5829C | Édition de logiciels applicatifs |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5829A | Édition de logiciels système et de réseau |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5829B | Édition de logiciels outils de développement et de langages |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 5812Z | Édition de répertoires et de fichiers d'adresses |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6391Z | Activités des agences de presse |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8690D | Activités des infirmiers et des sages-femmes |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8211Z | Services administratifs combinés de bureau |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8020Z | Activités liées aux systèmes de sécurité |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8623Z | Pratique dentaire |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9101Z | Gestion des bibliothèques et des archives |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 9002Z | Activités de soutien au spectacle vivant |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4110A | Promotion immobilière de logements |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4110C | Promotion immobilière d'autres bâtiments |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8291Z | Activités des agences de recouvrement de factures et des sociétés d'information financière sur la clientèle |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8560Z | Activités de soutien à l'enseignement |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7820Z | Activités des agences de travail temporaire |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4299Z | Construction d'autres ouvrages de génie civil n.c.a. |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 6130Z | Télécommunications par satellite |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8690F | Activités de santé humaine non classées ailleurs |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8553Z | Enseignement de la conduite |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8690A | Ambulances |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8690B | Laboratoires d'analyses médicales |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8690E | Activités des professionnels de la rééducation, de l'appareillage et des pédicures-podologues |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 4110D | Supports juridiques de programmes |

| | | | |
|--------------------------|---|-------|--|
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7911Z | Activités des agences de voyage |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7830Z | Autre mise à disposition de ressources humaines |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7810Z | Activités des agences de placement de main-d'œuvre |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7990Z | Autres services de réservation et activités connexes |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 7912Z | Activités des voyagistes |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8121Z | Nettoyage courant des bâtiments |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8122Z | Autres activités de nettoyage des bâtiments et nettoyage industriel |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8219Z | Photocopie, préparation de documents et autres activités spécialisées de soutien de bureau |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8299Z | Autres activités de soutien aux entreprises n.c.a. |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8230Z | Organisation de foires, salons professionnels et congrès |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8010Z | Activités de sécurité privée |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8110Z | Activités combinées de soutien lié aux bâtiments |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8129A | Désinfection, désinsectisation, dératisation |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8220Z | Activités de centres d'appels |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8129B | Autres activités de nettoyage n.c.a. |
| Bureaux | Bureaux privés hors: banque, assurance, bureaux d'étude | 8030Z | Activités d'enquête |
| Cafés-hôtels-restaurants | Cafés, cantines, traiteurs | 5621Z | Services des traiteurs |
| Cafés-hôtels-restaurants | Cafés, cantines, traiteurs | 5629B | Autres services de restauration n.c.a. |
| Cafés-hôtels-restaurants | Cafés, cantines, traiteurs | 5629A | Restauration collective sous contrat |
| Cafés-hôtels-restaurants | Cafés, cantines, traiteurs | 5630Z | Débits de boissons |
| Cafés-hôtels-restaurants | Hôtels | 5510Z | Hôtels et hébergement similaire |
| Cafés-hôtels-restaurants | Restaurants | 5610B | Cafétérias et autres libres-services |
| Cafés-hôtels-restaurants | Restaurants | 5610C | Restauration de type rapide |
| Cafés-hôtels-restaurants | Restaurants | 5610A | Restauration traditionnelle |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9603Z | Services funéraires |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9512Z | Réparation d'équipements de communication |

| | | | |
|----------|---|-------|--|
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9601A | Blanchisserie-teinturerie de gros |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9529Z | Réparation d'autres biens personnels et domestiques |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9521Z | Réparation de produits électroniques grand public |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9601B | Blanchisserie-teinturerie de détail |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9525Z | Réparation d'articles d'horlogerie et de bijouterie |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9604Z | Entretien corporel |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9511Z | Réparation d'ordinateurs et d'équipements périphériques |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9602A | Coiffure |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9522Z | Réparation d'appareils électroménagers et d'équipements pour la maison et le jardin |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 7420Z | Activités photographiques |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9609Z | Autres services personnels n.c.a. |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9602B | Soins de beauté |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9313Z | Activités des centres de culture physique |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 4520B | Entretien et réparation d'autres véhicules automobiles |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 1071D | Pâtisserie |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 1071B | Cuisson de produits de boulangerie |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 4520A | Entretien et réparation de véhicules automobiles légers |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 1071C | Boulangerie et boulangerie-pâtisserie |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 8292Z | Activités de conditionnement |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 9523Z | Réparation de chaussures et d'articles en cuir |
| Commerce | Boulangerie, blanchisserie, coiffure, autre process | 1013B | Charcuterie |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4754Z | Commerce de détail d'appareils électroménagers en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4719A | Grands magasins |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4753Z | Commerce de détail de tapis, moquettes et revêtements de murs et de sols en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4730Z | Commerce de détail de carburants en magasin spécialisé |

| | | | |
|----------|------------------------------------|-------|---|
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4772B | Commerce de détail de maroquinerie et d'articles de voyage |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4752B | Commerce de détail de quincaillerie, peintures et verres en grandes surfaces (400 m ² et plus) |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4751Z | Commerce de détail de textiles en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4778A | Commerce de détail de charbons et combustibles |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4759A | Commerce de détail de meubles |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4741Z | Commerce de détail d'ordinateurs, d'unités périphériques et de logiciels en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4772A | Commerce de détail de la chaussure |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4774Z | Commerce de détail d'articles médicaux et orthopédiques en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4752A | Commerce de détail de quincaillerie, peintures et verres en petites surfaces (moins de 400 m ²) |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4777Z | Commerce de détail d'articles d'horlogerie et de bijouterie en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4779Z | Commerce de détail de biens d'occasion en magasin |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4776Z | Commerce de détail de fleurs, plantes, graines, engrains, animaux de compagnie et aliments pour ces animaux en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4765Z | Commerce de détail de jeux et jouets en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4764Z | Commerce de détail d'articles de sport en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4762Z | Commerce de détail de journaux et papeterie en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4726Z | Commerce de détail de produits à base de tabac en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4759B | Commerce de détail d'autres équipements du foyer |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4799A | Vente à domicile |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4742Z | Commerce de détail de matériels de télécommunication en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4763Z | Commerce de détail d'enregistrements musicaux et vidéo en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4743Z | Commerce de détail de matériels audio et vidéo en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4778C | Autres commerces de détail spécialisés divers |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4761Z | Commerce de détail de livres en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4778B | Vente par automates et autres commerces de détail hors magasin, éventaires ou marchés n.c.a. |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4799B | Commerce de détail de charbons et combustibles |

| | | | |
|----------|------------------------------------|-------|---|
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4719B | Autres commerces de détail en magasin non spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4782Z | Commerce de détail de textiles, d'habillement et de chaussures sur éventaires et marchés |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4791B | Vente à distance sur catalogue spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4773Z | Commerce de détail de produits pharmaceutiques en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4771Z | Commerce de détail d'habillement en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4791A | Vente à distance sur catalogue général |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4789Z | Autres commerces de détail sur éventaires et marchés |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4531Z | Commerce de gros d'équipements automobiles |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4775Z | Commerce de détail de parfumerie et de produits de beauté en magasin spécialisé |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4511Z | Commerce de voitures et de véhicules automobiles légers |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4519Z | Commerce d'autres véhicules automobiles |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4532Z | Commerce de détail d'équipements automobiles |
| Commerce | Commerce de détail non alimentaire | 4540Z | Commerce et réparation de motocycles |
| Commerce | Commerce de gros | 4671Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de combustibles et de produits annexes |
| Commerce | Commerce de gros | 4669B | Commerce de gros (commerce interentreprises) de fournitures et équipements industriels divers |
| Commerce | Commerce de gros | 4635Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de produits à base de tabac |
| Commerce | Commerce de gros | 4665Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de mobilier de bureau |
| Commerce | Commerce de gros | 4672Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de minéraux et métaux |
| Commerce | Commerce de gros | 4677Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de déchets et débris |
| Commerce | Commerce de gros | 4663Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de machines pour l'extraction, la construction et le génie civil |
| Commerce | Commerce de gros | 4673B | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'appareils sanitaires et de produits de décoration |
| Commerce | Commerce de gros | 4645Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de parfumerie et de produits de beauté |
| Commerce | Commerce de gros | 4666Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'autres machines et équipements de bureau |
| Commerce | Commerce de gros | 4662Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de machines-outils |
| Commerce | Commerce de gros | 4661Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de matériel agricole |

| | | | |
|----------|------------------|-------|--|
| Commerce | Commerce de gros | 4652Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de composants et d'équipements électroniques et de télécommunication |
| Commerce | Commerce de gros | 4651Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'ordinateurs, d'équipements informatiques périphériques et de logiciels |
| Commerce | Commerce de gros | 4641Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de textiles |
| Commerce | Commerce de gros | 4673A | Commerce de gros (commerce interentreprises) de bois et de matériaux de construction |
| Commerce | Commerce de gros | 4664Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de machines pour l'industrie textile et l'habillement |
| Commerce | Commerce de gros | 4639B | Commerce de gros (commerce interentreprises) alimentaire non spécialisé |
| Commerce | Commerce de gros | 4639A | Commerce de gros (commerce interentreprises) de produits surgelés |
| Commerce | Commerce de gros | 4638A | Commerce de gros (commerce interentreprises) de poissons, crustacés et mollusques |
| Commerce | Commerce de gros | 4642Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'habillement et de chaussures |
| Commerce | Commerce de gros | 4674B | Commerce de gros (commerce interentreprises) de fournitures pour la plomberie et le chauffage |
| Commerce | Commerce de gros | 4648Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'articles d'horlogerie et de bijouterie |
| Commerce | Commerce de gros | 4646Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de produits pharmaceutiques |
| Commerce | Commerce de gros | 4632B | Commerce de gros (commerce interentreprises) de produits à base de viande |
| Commerce | Commerce de gros | 4633Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de produits laitiers, œufs, huiles et matières grasses comestibles |
| Commerce | Commerce de gros | 4675Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de produits chimiques |
| Commerce | Commerce de gros | 4676Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'autres produits intermédiaires |
| Commerce | Commerce de gros | 4637Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de café, thé, cacao et épices |
| Commerce | Commerce de gros | 4674A | Commerce de gros (commerce interentreprises) de quincaillerie |
| Commerce | Commerce de gros | 4644Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de vaisselle, verrerie et produits d'entretien |
| Commerce | Commerce de gros | 4621Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de céréales, de tabac non manufacturé, de semences et d'aliments pour le bétail |
| Commerce | Commerce de gros | 4638B | Commerce de gros (commerce interentreprises) alimentaire spécialisé divers |
| Commerce | Commerce de gros | 4622Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de fleurs et plantes |
| Commerce | Commerce de gros | 4647Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de meubles, de tapis et d'appareils d'éclairage |
| Commerce | Commerce de gros | 4636Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de sucre, chocolat et confiserie |

| | | | |
|------------------------|----------------------------|-------|--|
| Commerce | Commerce de gros | 4690Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) non spécialisé |
| Commerce | Commerce de gros | 4643Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'appareils électroménagers |
| Commerce | Commerce de gros | 4623Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'animaux vivants |
| Commerce | Commerce de gros | 4624Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de cuirs et peaux |
| Commerce | Commerce de gros | 4631Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de fruits et légumes |
| Commerce | Commerce de gros | 4632A | Commerce de gros (commerce interentreprises) de viandes de boucherie |
| Commerce | Commerce de gros | 4632C | Commerce de gros (commerce interentreprises) de volailles et gibier |
| Commerce | Commerce de gros | 4634Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) de boissons |
| Commerce | Commerce de gros | 4669A | Commerce de gros (commerce interentreprises) de matériel électrique |
| Commerce | Commerce de gros | 4649Z | Commerce de gros (commerce interentreprises) d'autres biens domestiques |
| Commerce | Commerce de gros | 4669C | Commerce de gros (commerce interentreprises) de fournitures et équipements divers pour le commerce et les services |
| Commerce | Entrepôts | 5210B | Entreposage et stockage non frigorifique |
| Commerce | Entrepôts | 5210A | Entreposage et stockage frigorifique |
| Commerce | Grand commerce alimentaire | 4711F | Hypermarchés |
| Commerce | Grand commerce alimentaire | 4711D | Supermarchés |
| Commerce | Grand commerce alimentaire | 4711E | Magasins multi-commerces |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4725Z | Commerce de détail de boissons en magasin spécialisé |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4724Z | Commerce de détail de pain, pâtisserie et confiserie en magasin spécialisé |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4711A | Commerce de détail de produits surgelés |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4711B | Commerce d'alimentation générale |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4729Z | Autres commerces de détail alimentaires en magasin spécialisé |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4721Z | Commerce de détail de fruits et légumes en magasin spécialisé |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4781Z | Commerce de détail alimentaire sur éventaires et marchés |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4722Z | Commerce de détail de viandes et de produits à base de viande en magasin spécialisé |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4711C | Supérettes |
| Commerce | Petit commerce alimentaire | 4723Z | Commerce de détail de poissons, crustacés et mollusques en magasin spécialisé |
| Enseignement-recherche | Enseignement primaire | 8520Z | Enseignement primaire |
| Enseignement-recherche | Enseignement primaire | 8510Z | Enseignement pré-primaire |
| Enseignement-recherche | Enseignement secondaire | 8532Z | Enseignement secondaire technique ou professionnel |

| | | | |
|------------------------|--|-------|---|
| Enseignement-recherche | Enseignement secondaire | 8531Z | Enseignement secondaire général |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 7220Z | Recherche-développement en sciences humaines et sociales |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 7211Z | Recherche-développement en biotechnologie |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 8541Z | Enseignement post-secondaire non supérieur |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 8559B | Autres enseignements |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 7219Z | Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 8542Z | Enseignement supérieur |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 8559A | Formation continue d'adultes |
| Enseignement-recherche | Enseignement supérieur | 8552Z | Enseignement culturel |
| Habitat communautaire | Habitat communautaire hors maisons de retraite | 5590Z | Autres hébergements |
| Habitat communautaire | Habitat communautaire hors maisons de retraite | 5530Z | Terrains de camping et parcs pour caravanes ou véhicules de loisirs |
| Habitat communautaire | Habitat communautaire hors maisons de retraite | 8422Z | Défense |
| Habitat communautaire | Habitat communautaire hors maisons de retraite | 9491Z | Activités des organisations religieuses |
| Habitat communautaire | Habitat communautaire hors maisons de retraite | 8810A | Aide à domicile |
| Habitat communautaire | Habitat communautaire hors maisons de retraite | 5520Z | Hébergement touristique et autre hébergement de courte durée |
| Habitat communautaire | Maisons de retraite | 8730A | Hébergement social pour personnes âgées |
| Habitat communautaire | Maisons de retraite | 8710A | Hébergement médicalisé pour personnes âgées |
| Santé | Etablissements hospitaliers | 8610Z | Activités hospitalières |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8720A | Hébergement social pour handicapés mentaux et malades mentaux |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8790A | Hébergement social pour enfants en difficultés |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8710C | Hébergement médicalisé pour adultes handicapés et autre hébergement médicalisé |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8810B | Accueil ou accompagnement sans hébergement d'adultes handicapés ou de personnes âgées |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8899A | Autre accueil ou accompagnement sans hébergement d'enfants et d'adolescents |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8720B | Hébergement social pour toxicomanes |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8710B | Hébergement médicalisé pour enfants handicapés |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8899B | Action sociale sans hébergement n.c.a. |

| | | | |
|-----------------------|--|-------|--|
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8891A | Accueil de jeunes enfants |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8690C | Centres de collecte et banques d'organes |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8891B | Accueil ou accompagnement sans hébergement d'enfants handicapés |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8790B | Hébergement social pour adultes et familles en difficultés et autre hébergement social |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8730B | Hébergement social pour handicapés physiques |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8622C | Autres activités des médecins spécialistes |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8622B | Activités chirurgicales |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8810C | Aide par le travail |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8621Z | Activité des médecins généralistes |
| Santé | Santé hors établissements hospitaliers | 8622A | Activités de radiodiagnostic et de radiothérapie |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 3811Z | Collecte des déchets non dangereux |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 3821Z | Traitements et élimination des déchets non dangereux |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 3812Z | Collecte des déchets dangereux |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 3600Z | Captage, traitement et distribution d'eau |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 3700Z | Collecte et traitement des eaux usées |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 4939C | Téléphériques et remontées mécaniques |
| Sport-loisirs-culture | Eau, déchets, téléphériques | 3822Z | Traitements et élimination des déchets dangereux |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 6020B | Édition de chaînes thématiques |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9004Z | Gestion de salles de spectacles |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 6010Z | Édition et diffusion de programmes radio |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5914Z | Projection de films cinématographiques |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5911C | Production de films pour le cinéma |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5911B | Production de films institutionnels et publicitaires |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5913B | Édition et distribution vidéo |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 6020A | Édition de chaînes généralistes |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 8551Z | Enseignement de disciplines sportives et d'activités de loisirs |

| | | | |
|-----------------------|------------------|-------|---|
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5911A | Production de films et de programmes pour la télévision |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9003B | Autre création artistique |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5912Z | Post-production de films cinématographiques, de vidéo et de programmes de télévision |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9103Z | Gestion des sites et monuments historiques et des attractions touristiques similaires |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9001Z | Arts du spectacle vivant |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9200Z | Organisation de jeux de hasard et d'argent |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9102Z | Gestion des musées |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9003A | Création artistique relevant des arts plastiques |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9329Z | Autres activités récréatives et de loisirs |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9321Z | Activités des parcs d'attractions et parcs à thèmes |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 9104Z | Gestion des jardins botaniques et zoologiques et des réserves naturelles |
| Sport-loisirs-culture | Locaux culturels | 5913A | Distribution de films cinématographiques |
| Sport-loisirs-culture | Locaux sportifs | 9311Z | Gestion d'installations sportives |
| Sport-loisirs-culture | Locaux sportifs | 9312Z | Activités de clubs de sports |
| Sport-loisirs-culture | Locaux sportifs | 9319Z | Autres activités liées au sport |
| Transport | Transport | 4950Z | Transports par conduites |
| Transport | Transport | 4932Z | Transports de voyageurs par taxis |
| Transport | Transport | 4942Z | Services de déménagement |
| Transport | Transport | 4941B | Transports routiers de fret de proximité |
| Transport | Transport | 4939B | Autres transports routiers de voyageurs |
| Transport | Transport | 4941C | Location de camions avec chauffeur |
| Transport | Transport | 4910Z | Transport ferroviaire interurbain de voyageurs |
| Transport | Transport | 4920Z | Transports ferroviaires de fret |
| Transport | Transport | 4939A | Transports routiers réguliers de voyageurs |
| Transport | Transport | 5223Z | Services auxiliaires des transports aériens |
| Transport | Transport | 5030Z | Transports fluviaux de passagers |
| Transport | Transport | 5010Z | Transports maritimes et côtiers de passagers |
| Transport | Transport | 5040Z | Transports fluviaux de fret |
| Transport | Transport | 5020Z | Transports maritimes et côtiers de fret |
| Transport | Transport | 5122Z | Transports spatiaux |
| Transport | Transport | 5110Z | Transports aériens de passagers |
| Transport | Transport | 5121Z | Transports aériens de fret |
| Transport | Transport | 5221Z | Services auxiliaires des transports terrestres |
| Transport | Transport | 4941A | Transports routiers de fret interurbains |

| | | | |
|-----------|-----------|-------|---|
| Transport | Transport | 5222Z | Services auxiliaires des transports par eau |
| Transport | Transport | 4931Z | Transports urbains et suburbains de voyageurs |

Tableau 48: Correspondance entre codes APE, branches et sous-branches définies par le CEREN

| Catégorie de construction | APE | Nomenclature |
|---------------------------|-------|---|
| Artisanat | 9601A | Blanchisserie-teinturerie de gros |
| Artisanat | 9601B | Blanchisserie-teinturerie de détail |
| Artisanat | 9602A | Coiffure |
| Artisanat | 9602B | Soins de beauté |
| Artisanat | 9603Z | Services funéraires |
| Artisanat | 9604Z | Entretien corporel |
| Artisanat | 9609Z | Autres services personnels n.c.a. |
| Artisanat | 9700Z | Activités des ménages en tant qu'employeurs de personnel domestique |
| Artisanat | 9810Z | Activités indifférenciées des ménages en tant que producteurs de biens pour usage propre |
| Artisanat | 9820Z | Activités indifférenciées des ménages en tant que producteurs de services pour usage propre |
| Bureau | 4110A | Promotion immobilière de logements |
| Bureau | 4110B | Promotion immobilière de bureaux |
| Bureau | 4110C | Promotion immobilière d'autres bâtiments |
| Bureau | 4110D | Supports juridiques de programmes |
| Bureau | 5811Z | Édition de livres |
| Bureau | 5812Z | Édition de répertoires et de fichiers d'adresses |
| Bureau | 5813Z | Édition de journaux |
| Bureau | 5814Z | Édition de revues et périodiques |
| Bureau | 5819Z | Autres activités d'édition |
| Bureau | 5821Z | Édition de jeux électroniques |
| Bureau | 5829A | Édition de logiciels système et de réseau |
| Bureau | 5829B | Edition de logiciels outils de développement et de langages |
| Bureau | 5829C | Edition de logiciels applicatifs |
| Bureau | 5911A | Production de films et de programmes pour la télévision |
| Bureau | 5911B | Production de films institutionnels et publicitaires |
| Bureau | 5911C | Production de films pour le cinéma |
| Bureau | 5912Z | Post-production de films cinématographiques, de vidéo et de programmes de télévision |
| Bureau | 5913A | Distribution de films cinématographiques |
| Bureau | 5913B | Edition et distribution vidéo |
| Bureau | 5914Z | Projection de films cinématographiques |
| Bureau | 5920Z | Enregistrement sonore et édition musicale |
| Bureau | 6010Z | Édition et diffusion de programmes radio |
| Bureau | 6020A | Edition de chaînes généralistes |
| Bureau | 6020B | Edition de chaînes thématiques |
| Bureau | 6110Z | Télécommunications filaires |
| Bureau | 6120Z | Télécommunications sans fil |
| Bureau | 6130Z | Télécommunications par satellite |
| Bureau | 6190Z | Autres activités de télécommunication |
| Bureau | 6201Z | Programmation informatique |
| Bureau | 6202A | Conseil en systèmes et logiciels informatiques |
| Bureau | 6202B | Tierce maintenance de systèmes et d'applications informatiques |
| Bureau | 6203Z | Gestion d'installations informatiques |
| Bureau | 6209Z | Autres activités informatiques |
| Bureau | 6311Z | Traitement de données, hébergement et activités connexes |
| Bureau | 6312Z | Portails internet |
| Bureau | 6391Z | Activités des agences de presse |

| | | |
|--------|-------|--|
| Bureau | 6399Z | Autres services d'information n.c.a. |
| Bureau | 6411Z | Activités de banque centrale |
| Bureau | 6419Z | Autres intermédiations monétaires |
| Bureau | 6420Z | Activités des sociétés holding |
| Bureau | 6430Z | Fonds de placement et entités financières similaires |
| Bureau | 6491Z | Crédit-bail |
| Bureau | 6492Z | Autre distribution de crédit |
| | 6499Z | Autres activités des services financiers, hors assurance et caisses de retraite, n.c.a. |
| Bureau | 6511Z | Assurance vie |
| Bureau | 6512Z | Autres assurances |
| Bureau | 6520Z | Réassurance |
| Bureau | 6530Z | Caisse de retraite |
| Bureau | 6611Z | Administration de marchés financiers |
| Bureau | 6612Z | Courtage de valeurs mobilières et de marchandises |
| Bureau | 6619A | Supports juridiques de gestion de patrimoine mobilier |
| | 6619B | Autres activités auxiliaires de services financiers, hors assurance et caisses de retraite, n.c.a. |
| Bureau | 6621Z | évaluation des risques et dommages |
| Bureau | 6622Z | Activités des agents et courtiers d'assurances |
| | 6629Z | Autres activités auxiliaires d'assurance et de caisses de retraite |
| Bureau | 6630Z | Gestion de fonds |
| Bureau | 6810Z | Activités des marchands de biens immobiliers |
| Bureau | 6820A | Location de logements |
| Bureau | 6820B | Location de terrains et d'autres biens immobiliers |
| Bureau | 6831Z | Agences immobilières |
| Bureau | 6832A | Administration d'immeubles et autres biens immobiliers |
| Bureau | 6832B | Supports juridiques de gestion de patrimoine immobilier |
| Bureau | 6910Z | Activités juridiques |
| Bureau | 6920Z | Activités comptables |
| Bureau | 7010Z | Activités des sièges sociaux |
| Bureau | 7021Z | Conseil en relations publiques et communication |
| Bureau | 7022Z | Conseil pour les affaires et autres conseils de gestion |
| Bureau | 7111Z | Activités d'architecture |
| Bureau | 7112A | Activité des géomètres |
| Bureau | 7112B | Ingénierie, études techniques |
| Bureau | 7120A | Contrôle technique automobile |
| Bureau | 7120B | Analyses, essais et inspections techniques |
| Bureau | 7211Z | Recherche-développement en biotechnologie |
| | 7219Z | Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles |
| Bureau | 7220Z | Recherche-développement en sciences humaines et sociales |
| Bureau | 7311Z | Activités des agences de publicité |
| Bureau | 7312Z | Régie publicitaire de médias |
| Bureau | 7320Z | études de marché et sondages |
| Bureau | 7410Z | Activités spécialisées de design |
| Bureau | 7420Z | Activités photographiques |
| Bureau | 7430Z | Traduction et interprétation |
| Bureau | 7490A | Activité des économistes de la construction |
| Bureau | 7490B | Activités spécialisées, scientifiques et techniques diverses |
| Bureau | 7500Z | Activités vétérinaires |

| | | |
|--------|-------|---|
| Bureau | 7711A | Location de courte durée de voitures et de véhicules automobiles légers |
| Bureau | 7711B | Location de longue durée de voitures et de véhicules automobiles légers |
| Bureau | 7712Z | Location et location-bail de camions |
| Bureau | 7721Z | Location et location-bail d'articles de loisirs et de sport |
| Bureau | 7722Z | Location de vidéocassettes et disques vidéo |
| Bureau | 7729Z | Location et location-bail d'autres biens personnels et domestiques |
| Bureau | 7731Z | Location et location-bail de machines et équipements agricoles |
| Bureau | 7732Z | Location et location-bail de machines et équipements pour la construction |
| Bureau | 7733Z | Location et location-bail de machines de bureau et de matériel informatique |
| Bureau | 7734Z | Location et location-bail de matériels de transport par eau |
| Bureau | 7735Z | Location et location-bail de matériels de transport aérien |
| Bureau | 7739Z | Location et location-bail d'autres machines, équipements et biens matériels n.c.a. |
| Bureau | 7740Z | Location-bail de propriété intellectuelle et de produits similaires, à l'exception des œuvres soumises à copyright |
| Bureau | 7810Z | Activités des agences de placement de main-d'œuvre |
| Bureau | 7820Z | Activités des agences de travail temporaire |
| Bureau | 7830Z | Autre mise à disposition de ressources humaines |
| Bureau | 7911Z | Activités des agences de voyage |
| Bureau | 7912Z | Activités des voyagistes |
| Bureau | 7990Z | Autres services de réservation et activités connexes |
| Bureau | 8010Z | Activités de sécurité privée |
| Bureau | 8020Z | Activités liées aux systèmes de sécurité |
| Bureau | 8030Z | Activités d'enquête |
| Bureau | 8110Z | Activités combinées de soutien lié aux bâtiments |
| Bureau | 8121Z | Nettoyage courant des bâtiments |
| Bureau | 8122Z | Autres activités de nettoyage des bâtiments et nettoyage industriel |
| Bureau | 8129A | Désinfection, désinsectisation, dératisation |
| Bureau | 8129B | Autres activités de nettoyage n.c.a. |
| Bureau | 8130Z | Services d'aménagement paysager |
| Bureau | 8211Z | Services administratifs combinés de bureau |
| Bureau | 8219Z | Photocopie, préparation de documents et autres activités spécialisées de soutien de bureau |
| Bureau | 8220Z | Activités de centres d'appels |
| Bureau | 8230Z | Organisation de foires, salons professionnels et congrès |
| Bureau | 8291Z | Activités des agences de recouvrement de factures et des sociétés d'information financière sur la clientèle |
| Bureau | 8292Z | Activités de conditionnement |
| Bureau | 8299Z | Autres activités de soutien aux entreprises n.c.a. |
| Bureau | 8411Z | Administration publique générale |
| Bureau | 8412Z | Administration publique (tutelle) de la santé, de la formation, de la culture et des services sociaux, autre que sécurité sociale |
| Bureau | 8413Z | Administration publique (tutelle) des activités économiques |
| Bureau | 8421Z | Affaires étrangères |

| | | |
|----------|-------|---|
| Bureau | 8422Z | Défense |
| Bureau | 8423Z | Justice |
| Bureau | 8424Z | Activités d'ordre public et de sécurité |
| Bureau | 8430A | Activités générales de sécurité sociale |
| Bureau | 8430B | Gestion des retraites complémentaires |
| Bureau | 8430C | Distribution sociale de revenus |
| Bureau | 9411Z | Activités des organisations patronales et consulaires |
| Bureau | 9412Z | Activités des organisations professionnelles |
| Bureau | 9420Z | Activités des syndicats de salariés |
| Bureau | 9492Z | Activités des organisations politiques |
| Bureau | 9499Z | Autres organisations fonctionnant par adhésion volontaire |
| Bureau | 9900Z | Activités des organisations et organismes extraterritoriaux |
| Commerce | 1013B | Charcuterie |
| Commerce | 1061A | Meunerie |
| Commerce | 1071C | Boulangerie et boulangerie-pâtisserie |
| Commerce | 1071D | Pâtisserie |
| Commerce | 4511Z | Commerce de voitures et de véhicules automobiles légers |
| Commerce | 4519Z | Commerce d'autres véhicules automobiles |
| Commerce | 4520A | Entretien et réparation de véhicules automobiles légers |
| Commerce | 4520B | Entretien et réparation d'autres véhicules automobiles |
| Commerce | 4531Z | Commerce de gros d'équipements automobiles |
| Commerce | 4532Z | Commerce de détail d'équipements automobiles |
| Commerce | 4540Z | Commerce et réparation de motocycles |
| Commerce | 4611Z | Intermédiaires du commerce en matières premières agricoles, animaux vivants, matières premières textiles et |
| Commerce | 4612A | Centrales d'achat de carburant |
| Commerce | 4612B | Autres intermédiaires du commerce en combustibles, métaux, minéraux et produits chimiques |
| Commerce | 4613Z | Intermédiaires du commerce en bois et matériaux de construction |
| Commerce | 4614Z | Intermédiaires du commerce en machines, équipements industriels, navires et avions |
| Commerce | 4615Z | Intermédiaires du commerce en meubles, articles de ménage et quincaillerie |
| Commerce | 4616Z | Intermédiaires du commerce en textiles, habillement, fourrures, chaussures et articles en cuir |
| Commerce | 4617A | Centrales d'achat alimentaires |
| Commerce | 4617B | Autres intermédiaires du commerce en denrées, boissons et tabac |
| Commerce | 4618Z | Intermédiaires spécialisés dans le commerce d'autres produits spécifiques |
| Commerce | 4619A | Centrales d'achat non alimentaires |
| Commerce | 4619B | Autres intermédiaires du commerce en produits divers |
| Commerce | 4621Z | Commerce de gros de céréales, de tabac non manufacturé, de semences et d'aliments pour le bétail |
| Commerce | 4622Z | Commerce de gros de fleurs et plantes |
| Commerce | 4623Z | Commerce de gros d'animaux vivants |
| Commerce | 4624Z | Commerce de gros de cuirs et peaux |
| Commerce | 4631Z | Commerce de gros de fruits et légumes |
| Commerce | 4632A | Commerce de gros de viandes de boucherie |
| Commerce | 4632B | Commerce de gros de produits à base de viande |
| Commerce | 4632C | Commerce de gros de volailles et gibier |

| | | |
|----------|-------|---|
| Commerce | 4633Z | Commerce de gros de produits laitiers, œufs, huiles et matières grasses comestibles |
| Commerce | 4634Z | Commerce de gros de boissons |
| Commerce | 4635Z | Commerce de gros de produits à base de tabac |
| Commerce | 4636Z | Commerce de gros de sucre, chocolat et confiserie |
| Commerce | 4637Z | Commerce de gros de café, thé, cacao et épices |
| Commerce | 4638A | Commerce de gros de poissons, crustacés et mollusques |
| Commerce | 4638B | Commerce de gros alimentaire spécialisé divers |
| Commerce | 4639A | Commerce de gros de produits surgelés |
| Commerce | 4639B | Commerce de gros alimentaire non spécialisé |
| Commerce | 4641Z | Commerce de gros de textiles |
| Commerce | 4642Z | Commerce de gros d'habillement et de chaussures |
| Commerce | 4643Z | Commerce de gros d'appareils électroménagers |
| Commerce | 4644Z | Commerce de gros de vaisselle, verrerie et produits d'entretien |
| Commerce | 4645Z | Commerce de gros de parfumerie et de produits de beauté |
| Commerce | 4646Z | Commerce de gros de produits pharmaceutiques |
| Commerce | 4647Z | Commerce de gros de meubles, de tapis et d'appareils d'éclairage |
| Commerce | 4648Z | Commerce de gros d'articles d'horlogerie et de bijouterie |
| Commerce | 4649Z | Commerce de gros d'autres biens domestiques |
| Commerce | 4651Z | Commerce de gros d'ordinateurs, d'équipements informatiques périphériques et de logiciels |
| Commerce | 4652Z | Commerce de gros de composants et d'équipements électroniques et de télécommunication |
| Commerce | 4661Z | Commerce de gros de matériel agricole |
| Commerce | 4662Z | Commerce de gros de machines-outils |
| Commerce | 4663Z | Commerce de gros de machines pour l'extraction, la construction et le génie civil |
| Commerce | 4664Z | Commerce de gros de machines pour l'industrie textile et l'habillement |
| Commerce | 4665Z | Commerce de gros de mobilier de bureau |
| Commerce | 4666Z | Commerce de gros d'autres machines et équipements de bureau |
| Commerce | 4669A | Commerce de gros de matériel électrique |
| Commerce | 4669B | Commerce de gros de fournitures et équipements industriels divers |
| Commerce | 4669C | Commerce de gros de fournitures et équipements divers pour le commerce et les services |
| Commerce | 4671Z | Commerce de gros de combustibles et de produits annexes |
| Commerce | 4672Z | Commerce de gros de minéraux et métaux |
| Commerce | 4673A | Commerce de gros de bois et de matériaux de construction |
| Commerce | 4673B | Commerce de gros d'appareils sanitaires et de produits de décoration |
| Commerce | 4674A | Commerce de gros de quincaillerie |
| Commerce | 4674B | Commerce de gros de fournitures pour la plomberie et le chauffage |
| Commerce | 4675Z | Commerce de gros de produits chimiques |
| Commerce | 4676Z | Commerce de gros d'autres produits intermédiaires |
| Commerce | 4677Z | Commerce de gros de déchets et débris |
| Commerce | 4690Z | Commerce de gros non spécialisé |
| Commerce | 4711A | Commerce de détail de produits surgelés |
| Commerce | 4711B | Commerce d'alimentation générale |

| | | |
|----------|-------|---|
| Commerce | 4711C | Supérettes |
| Commerce | 4711D | Supermarchés |
| Commerce | 4711E | Magasins multi-commerces |
| Commerce | 4711F | Hypermarchés |
| Commerce | 4719A | Grands magasins |
| Commerce | 4719B | Autres commerces de détail en magasin non spécialisé |
| Commerce | 4721Z | Commerce de détail de fruits et légumes en magasin spécialisé |
| Commerce | 4722Z | Commerce de détail de viandes et de produits à base de viande en magasin spécialisé |
| Commerce | 4723Z | Commerce de détail de poissons, crustacés et mollusques en magasin spécialisé |
| Commerce | 4724Z | Commerce de détail de pain, pâtisserie et confiserie en magasin spécialisé |
| Commerce | 4725Z | Commerce de détail de boissons en magasin spécialisé |
| Commerce | 4726Z | Commerce de détail de produits à base de tabac en magasin spécialisé |
| Commerce | 4729Z | Autres commerces de détail alimentaires en magasin spécialisé |
| Commerce | 4730Z | Commerce de détail de carburants en magasin spécialisé |
| Commerce | 4741Z | Commerce de détail d'ordinateurs, d'unités périphériques et de logiciels en magasin spécialisé |
| Commerce | 4742Z | Commerce de détail de matériels de télécommunication en magasin spécialisé |
| Commerce | 4743Z | Commerce de détail de matériels audio et vidéo en magasin spécialisé |
| Commerce | 4751Z | Commerce de détail de textiles en magasin spécialisé |
| Commerce | 4752A | Commerce de détail de quincaillerie, peintures et verres en petites surfaces (moins de 400 m ²) |
| Commerce | 4752B | Commerce de détail de quincaillerie, peintures et verres en grandes surfaces (400 m ² et plus) |
| Commerce | 4753Z | Commerce de détail de tapis, moquettes et revêtements de murs et de sols en magasin spécialisé |
| Commerce | 4754Z | Commerce de détail d'appareils électroménagers en magasin spécialisé |
| Commerce | 4759A | Commerce de détail de meubles |
| Commerce | 4759B | Commerce de détail d'autres équipements du foyer |
| Commerce | 4761Z | Commerce de détail de livres en magasin spécialisé |
| Commerce | 4762Z | Commerce de détail de journaux et papeterie en magasin spécialisé |
| Commerce | 4763Z | Commerce de détail d'enregistrements musicaux et vidéo en magasin spécialisé |
| Commerce | 4764Z | Commerce de détail d'articles de sport en magasin spécialisé |
| Commerce | 4765Z | Commerce de détail de jeux et jouets en magasin spécialisé |
| Commerce | 4771Z | Commerce de détail d'habillement en magasin spécialisé |
| Commerce | 4772A | Commerce de détail de la chaussure |
| Commerce | 4772B | Commerce de détail de maroquinerie et d'articles de voyage |
| Commerce | 4773Z | Commerce de détail de produits pharmaceutiques en magasin spécialisé |
| Commerce | 4774Z | Commerce de détail d'articles médicaux et orthopédiques en magasin spécialisé |
| Commerce | 4775Z | Commerce de détail de parfumerie et de produits de beauté en magasin spécialisé |

| | | |
|----------------|-------|--|
| Commerce | 4776Z | Commerce de détail de fleurs, plantes, graines, engrais, animaux de compagnie et aliments pour ces animaux |
| Commerce | 4777Z | Commerce de détail d'articles d'horlogerie et de bijouterie en magasin spécialisé |
| Commerce | 4778A | Commerces de détail d'optique |
| Commerce | 4778B | Commerces de détail de charbons et combustibles |
| Commerce | 4778C | Autres commerces de détail spécialisés divers |
| Commerce | 4779Z | Commerce de détail de biens d'occasion en magasin |
| Commerce | 4781Z | Commerce de détail alimentaire sur éventaires et marchés |
| Commerce | 4782Z | Commerce de détail de textiles, d'habillement et de chaussures sur éventaires et marchés |
| Commerce | 4789Z | Autres commerces de détail sur éventaires et marchés |
| Commerce | 4791A | Vente à distance sur catalogue général |
| Commerce | 4791B | Vente à distance sur catalogue spécialisé |
| Commerce | 4799A | Vente à domicile |
| Commerce | 4799B | Vente par automates et autres commerces de détail hors magasin, éventaires ou marchés n.c.a. |
| Commerce | 5610A | Restauration traditionnelle |
| Commerce | 5610B | Cafétérias et autres libres-services |
| Commerce | 5610C | Restauration de type rapide |
| Commerce | 5621Z | Services des traiteurs |
| Commerce | 5629A | Restauration collective sous contrat |
| Commerce | 5629B | Autres services de restauration n.c.a. |
| Commerce | 5630Z | Débits de boissons |
| Commerce | 9511Z | Réparation d'ordinateurs et d'équipements périphériques |
| Commerce | 9512Z | Réparation d'équipements de communication |
| Commerce | 9521Z | Réparation de produits électroniques grand public |
| Commerce | 9522Z | Réparation d'appareils électroménagers et d'équipements pour la maison et le jardin |
| Commerce | 9523Z | Réparation de chaussures et d'articles en cuir |
| Commerce | 9524Z | Réparation de meubles et d'équipements du foyer |
| Commerce | 9525Z | Réparation d'articles d'horlogerie et de bijouterie |
| Commerce | 9529Z | Réparation d'autres biens personnels et domestiques |
| Culture Loisir | 9001Z | Arts du spectacle vivant |
| Culture Loisir | 9002Z | Activités de soutien au spectacle vivant |
| Culture Loisir | 9003A | Création artistique relevant des arts plastiques |
| Culture Loisir | 9003B | Autre création artistique |
| Culture Loisir | 9004Z | Gestion de salles de spectacles |
| Culture Loisir | 9101Z | Gestion des bibliothèques et des archives |
| Culture Loisir | 9102Z | Gestion des musées |
| Culture Loisir | 9103Z | Gestion des sites et monuments historiques et des attractions touristiques similaires |
| Culture Loisir | 9104Z | Gestion des jardins botaniques et zoologiques et des réserves naturelles |
| Culture Loisir | 9200Z | Organisation de jeux de hasard et d'argent |
| Culture Loisir | 9311Z | Gestion d'installations sportives |
| Culture Loisir | 9312Z | Activités de clubs de sports |
| Culture Loisir | 9313Z | Activités des centres de culture physique |
| Culture Loisir | 9319Z | Autres activités liées au sport |
| Culture Loisir | 9321Z | Activités des parcs d'attractions et parcs à thèmes |
| Culture Loisir | 9329Z | Autres activités récréatives et de loisirs |
| Culture Loisir | 9491Z | Activités des organisations religieuses |

| | | |
|--------------|-------|---|
| Enseignement | 8510Z | Enseignement pré-primaire |
| Enseignement | 8520Z | Enseignement primaire |
| Enseignement | 8531Z | Enseignement secondaire général |
| Enseignement | 8532Z | Enseignement secondaire technique ou professionnel |
| Enseignement | 8541Z | Enseignement post-secondaire non supérieur |
| Enseignement | 8542Z | Enseignement supérieur |
| Enseignement | 8551Z | Enseignement de disciplines sportives et d'activités de loisirs |
| Enseignement | 8552Z | Enseignement culturel |
| Enseignement | 8553Z | Enseignement de la conduite |
| Enseignement | 8559A | Formation continue d'adultes |
| Enseignement | 8559B | Autres enseignements |
| Enseignement | 8560Z | Activités de soutien à l'enseignement |
| Entrepôt | 5210A | Entreposage et stockage frigorifique |
| Entrepôt | 5210B | Entreposage et stockage non frigorifique |
| Entrepôt | 5221Z | Services auxiliaires des transports terrestres |
| Entrepôt | 5222Z | Services auxiliaires des transports par eau |
| Entrepôt | 5223Z | Services auxiliaires des transports aériens |
| Entrepôt | 5224A | Manutention portuaire |
| Entrepôt | 5224B | Manutention non portuaire |
| Entrepôt | 5229A | Messagerie, fret express |
| Entrepôt | 5229B | Affrètement et organisation des transports |
| Hébergement | 5510Z | Hôtels et hébergement similaire |
| Hébergement | 5520Z | Hébergement touristique et autre hébergement de courte durée |
| Hébergement | 5530Z | Terrains de camping et parcs pour caravanes ou véhicules de loisirs |
| Hébergement | 5590Z | Autres hébergements |
| Santé | 8610Z | Activités hospitalières |
| Santé | 8621Z | Activité des médecins généralistes |
| Santé | 8622A | Activités de radiodiagnostic et de radiothérapie |
| Santé | 8622B | Activités chirurgicales |
| Santé | 8622C | Autres activités des médecins spécialistes |
| Santé | 8623Z | Pratique dentaire |
| Santé | 8690A | Ambulances |
| Santé | 8690B | Laboratoires d'analyses médicales |
| Santé | 8690C | Centres de collecte et banques d'organes |
| Santé | 8690D | Activités des infirmiers et des sages-femmes |
| Santé | 8690E | Activités des professionnels de la rééducation, de l'appareillage et des pédicures-podologues |
| Santé | 8690F | Activités de santé humaine non classées ailleurs |
| Social | 8710A | Hébergement médicalisé pour personnes âgées |
| Social | 8710B | Hébergement médicalisé pour enfants handicapés |
| Social | 8710C | Hébergement médicalisé pour adultes handicapés et autre hébergement médicalisé |
| Social | 8720A | Hébergement social pour handicapés mentaux et malades mentaux |
| Social | 8720B | Hébergement social pour toxicomanes |
| Social | 8730A | Hébergement social pour personnes âgées |
| Social | 8730B | Hébergement social pour handicapés physiques |
| Social | 8790A | Hébergement social pour enfants en difficultés |

| | | |
|-----------|-------|--|
| Social | 8790B | Hébergement social pour adultes et familles en difficultés et autre hébergement social |
| Social | 8810A | Aide à domicile |
| Social | 8810B | Accueil ou accompagnement sans hébergement d'adultes handicapés ou de personnes âgées |
| Social | 8810C | Aide par le travail |
| Social | 8891A | Accueil de jeunes enfants |
| Social | 8891B | Accueil ou accompagnement sans hébergement d'enfants handicapés |
| Social | 8899A | Autre accueil ou accompagnement sans hébergement d'enfants et d'adolescents |
| Social | 8899B | Action sociale sans hébergement n.c.a. |
| Spécial | 3600Z | Captage, traitement et distribution d'eau |
| Spécial | 3811Z | Collecte des déchets non dangereux |
| Spécial | 8425Z | Services du feu et de secours |
| Transport | 4910Z | Transport ferroviaire interurbain de voyageurs |
| Transport | 4920Z | Transports ferroviaires de fret |
| Transport | 4931Z | Transports urbains et suburbains de voyageurs |
| Transport | 4932Z | Transports de voyageurs par taxis |
| Transport | 4939A | Transports routiers réguliers de voyageurs |
| Transport | 4939B | Autres transports routiers de voyageurs |
| Transport | 4939C | Téléphériques et remontées mécaniques |
| Transport | 4941A | Transports routiers de fret interurbains |
| Transport | 4941B | Transports routiers de fret de proximité |
| Transport | 4941C | Location de camions avec chauffeur |
| Transport | 4942Z | Services de déménagement |
| Transport | 4950Z | Transports par conduites |
| Transport | 5010Z | Transports maritimes et côtiers de passagers |
| Transport | 5020Z | Transports maritimes et côtiers de fret |
| Transport | 5030Z | Transports fluviaux de passagers |
| Transport | 5040Z | Transports fluviaux de fret |
| Transport | 5110Z | Transports aériens de passagers |
| Transport | 5121Z | Transports aériens de fret |
| Transport | 5122Z | Transports spatiaux |
| Transport | 5310Z | Activités de poste dans le cadre d'une obligation de service universel |
| Transport | 5320Z | Autres activités de poste et de courrier |

Tableau 49: Correspondance entre codes APE et catégories de construction

| Source | Bâtiment | Typologie | Date de construction | SHON | Ratio SU/SHON |
|--------------------------------|---|--|-----------------------|------|---------------|
| CNDB [77] | Résidence les Berges de l'Ubaye à Jausiers (04) | Logement collectif social | 2010 | 940 | 0,93 |
| CNDB [77] | Foyer d'hébergement «les tourelles» à Manosque (04) | Logement collectif social | 2011 | 2402 | 0,68 |
| CNDB [77] | 36 logements R+4 «Le Nova» Ilot N° Echirolles (38) | Logement collectif social | 2011 | 2981 | 0,93 |
| CNDB [77] | 46 logements à Le Cheylas (38) | Logement collectif social | 2010 | 4316 | 0,93 |
| CNDB [77] | 5 maisons à bande à patios Rives (38) | Logement, maisons groupées | 2010 | 708 | 0,76 |
| CNDB [77] | 3 logements sociaux «Le Buisson» à Bassens (73) | Logement locatif sociaux | 2010 | 217 | 0,92 |
| Rdb Architectes[78] | 21 logements locatifs Angers (49) | Logements locatifs | 2016 (RT2012) | 1707 | 0,76 |
| Rdb Architectes [78] | 15 logements collectifs Angers (49) | Logements collectifs | 2016 (RT2012) | 1057 | 0,84 |
| Rdb Architectes[78] | 20 logements collectifs Saumur (49) | Logements collectifs | 2014 | 1687 | 0,82 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Construction QEB / BBC de 37 logements collectifs à Auxerre par DOMANYS -Yonne (89) | Logements collectifs | 2009 | 3465 | 0,88 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Rénovation 20 logements Nuits-Saint-Georges (21) | Logements collectifs | 1972 | 1840 | 0,80 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Centre d'incendie et de secours, Recey-sur-Ource (21) | Tertiaire public | 2009 | 779 | 0,53 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Groupe scolaire Montmuzard - Ecole élémentaire, Dijon (21) | Tertiaire public - enseignement primaire | 2009 | 1009 | 0,88 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Le 225, Dijon (21) | Tertiaire privée - Bureaux | 2009 | 3388 | 0,92 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Maison de l'environnement et de l'architecture du Grand Dijon (21) - Latitude | Tertiaire public - Culture | 1979 (rénovation2008) | 820 | 0,71 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Maison de l'enfance, Auxonne (21) | Tertiaire public - enseignement primaire | 2009 | 734 | 0,87 |

| | | | | | |
|--------------------------------|--|---|------------------------|------|------|
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Pôle Santé Nuiton, Nuits-Saint-Georges (21) | Tertiaire privée - Santé, Social | 2007 | 1435 | 0,90 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Salle multi-usages, Savigny le Sec (21) | Tertiaire public - Sport, Culture, Loisir et Restauration | 2007 | 655 | 0,93 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Tour ELITHIS, Dijon (21) | Tertiaire privée - Bureaux, Restauration et Santé/Social | 2007 | 4931 | 0,93 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Centre de Secours principal, Nevers (58) | Tertiaire public - Services, Bureaux, Sport | 2010 | 5362 | 0,90 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Ecole Maternelle Pierre Malardier, Lormes (58) | Tertiaire public - enseignement primaire | 2007 | 577 | 0,88 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Réhabilitation IFSI (formation infirmière), Nevers (58) | Tertiaire public - enseignement supérieur | 1883 (rénovation 2012) | 3512 | 0,78 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Restaurant scolaire et Garderie, Sermoise-sur-Loire (58) | Tertiaire public - Restauration, enseignement | 2010 | 456 | 0,82 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | CAUE de Saône-et-Loire, Montceau-les-Mines (71) | Tertiaire privée - Bureaux, Culture | 1873 (rénovation 2011) | 624 | 0,82 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Ecole Charles Perrault, Montchanin (71) | Tertiaire public - Enseignement | 2008 | 697 | 0,88 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Ecole primaire, Montbellet (71) | Tertiaire public - enseignement primaire | 2009 | 413 | 0,87 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Maison départementale des solidarités, Montceau-les-Mines (71) | Tertiaire public - Santé, Social | 2007 | 1884 | 0,89 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Maison médicale, Tournus (71) | Tertiaire public - Santé, Social | 2010 | 1105 | 0,96 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Résidence Symphonie (pour personne handicapée), Blanzy (71) | Tertiaire public - Bureaux, Santé, Social | 2009 | 1529 | 0,87 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Bureaux du SYDESL, Mâcon (71) | Tertiaire public - Bureaux, Administration | 2008 | 1633 | 0,81 |

| | | | | | |
|--------------------------------|---|--|------------------------|-------|------|
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Agence de l'Eau Seine-Normandie, Sens (89) | Tertiaire public - Bureaux | 1979 (rénovation 2011) | 2227 | 0,87 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Groupe scolaire du Parc, l'Isle-sur-Serein (89) | Tertiaire public - Enseignement, Restauration, Loisirs | 2011 | 1298 | 0,89 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Scolaire communal - Bâtiment école, Sauvigny le Bois (89) | Tertiaire public - Enseignement | 2009 | 1314 | 0,78 |
| Bourgogne Bâtiment Durable[79] | Village d'entreprises du Sénonais, Sens (89) | Tertiaire public - Bureaux, Enseignement | 2008 | 2201 | 0,89 |
| BRIERE ARCHITECTES[80] | HOPITAL DE SANTE MENTALE - La Roche sur Foron (74) | Hôpital | 2012 | 14934 | 0,89 |
| BRIERE ARCHITECTES[81] | COLLEGE ST FRANCOIS DES CORDELIERS - Seynod (74) | Collège | 2011 | 3757 | 0,89 |

Tableau 50: Sources des données des ratios Surface Utile sur SHON

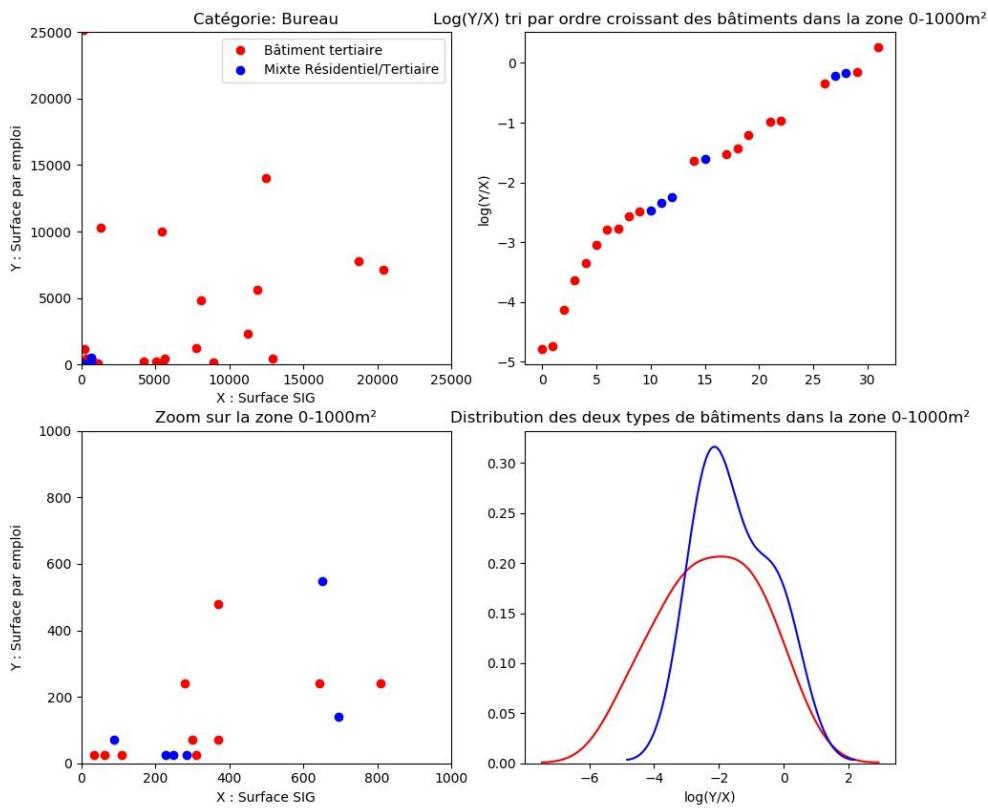


Figure 92: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Bureau

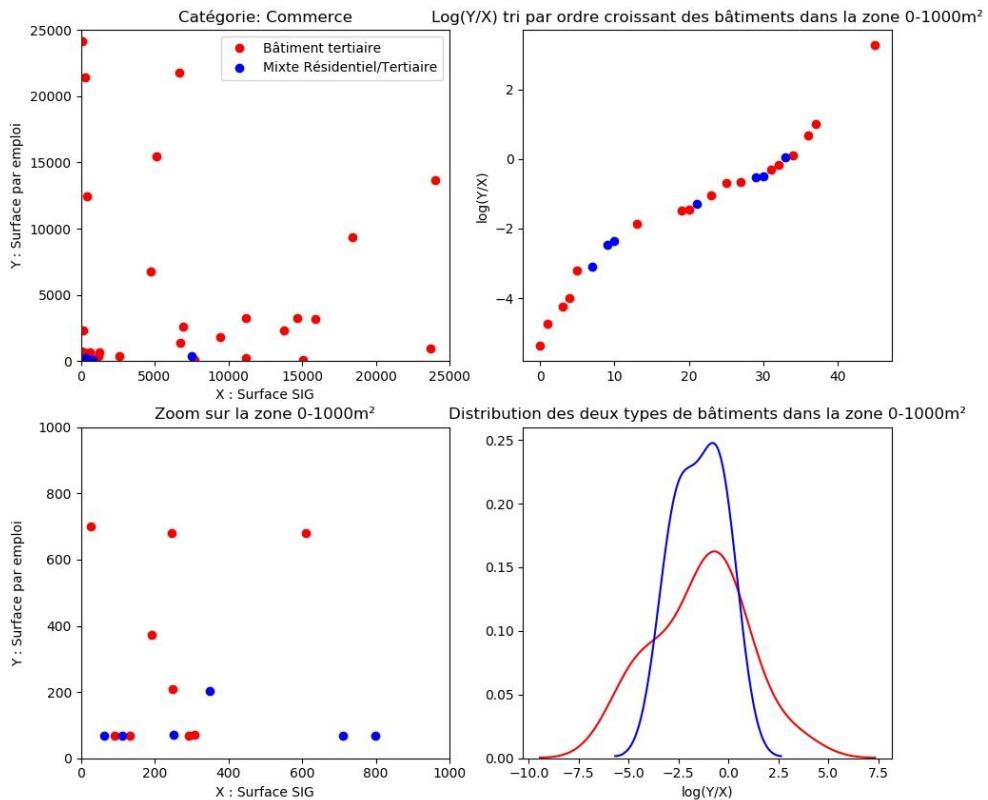


Figure 93: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Commerce

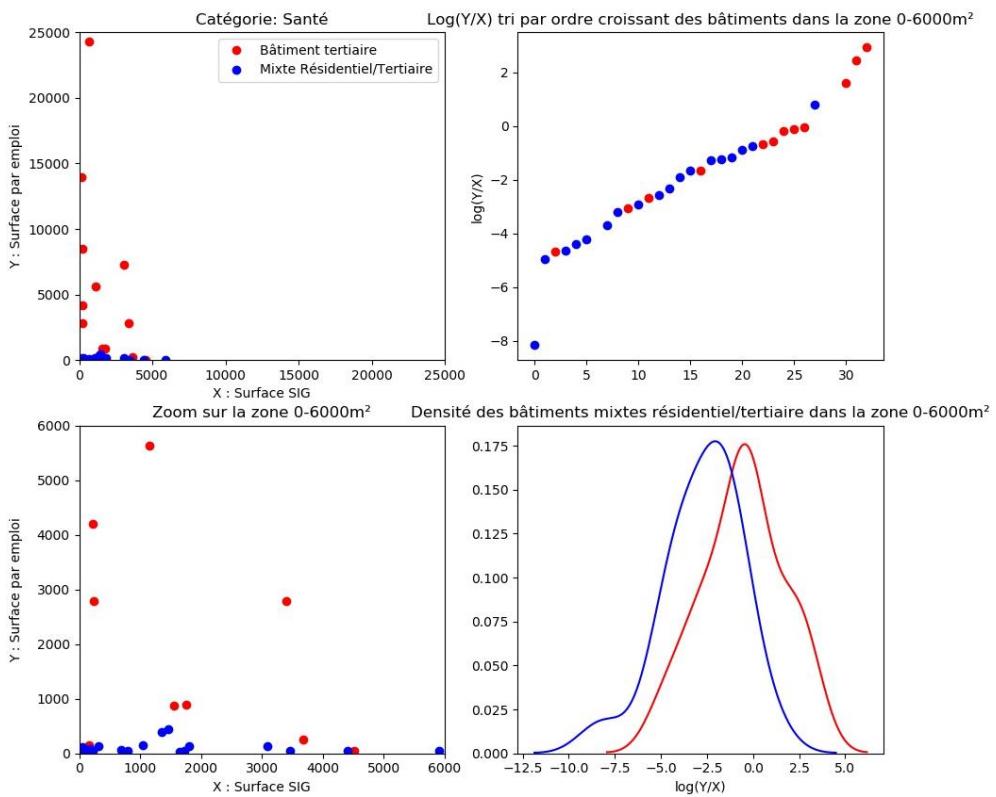


Figure 94: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Santé

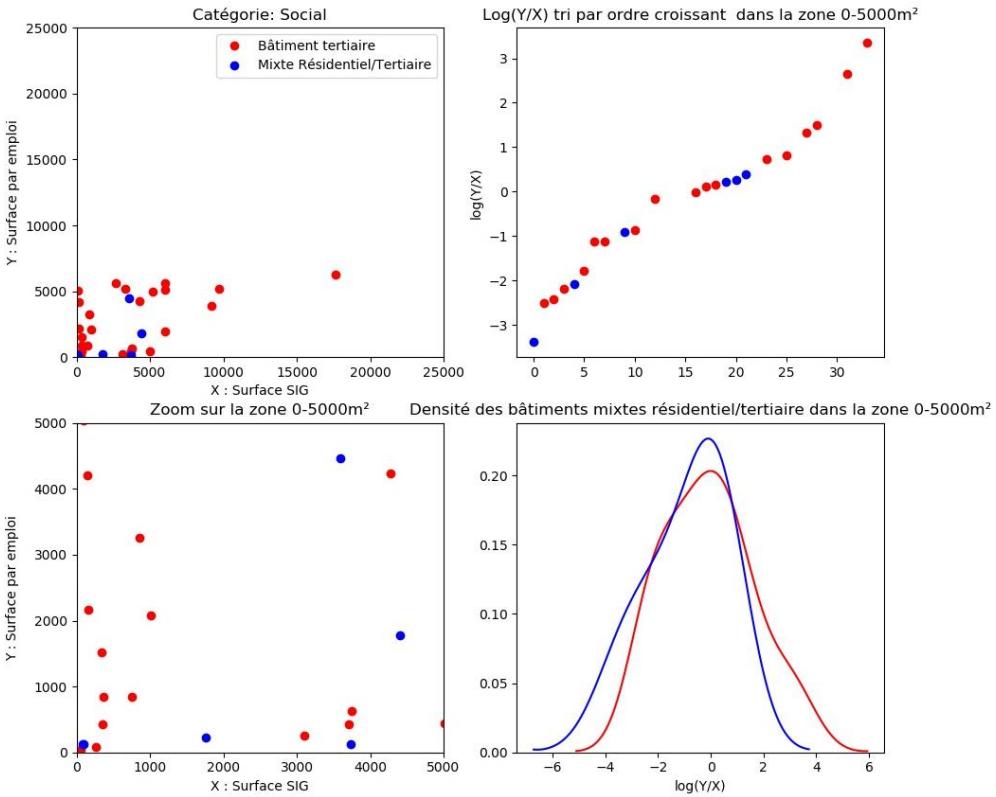


Figure 95: Aide à la recherche des bâtiments tertiaires « purs » et mixtes résidentiel-tertiaires de la catégorie Social

RÉSUMÉ

L'efficacité énergétique et la décarbonation des usages de l'énergie dans le secteur du bâtiment constituent un enjeu stratégique dans le cadre de la transition écologique en France. En 2019, le parc de bâtiments français représente 45% de la consommation finale d'énergie, le secteur tertiaire à lui seul compte pour 17%. La consommation d'énergie des bâtiments du secteur tertiaire et ses déterminants sont très peu documentés. La représentation du parc de bâtiments tertiaire français est aujourd'hui essentiellement basée sur des estimations de surface chauffée segmentées selon les activités économiques et l'énergie de chauffage. Ceci rend impossible la représentation de l'extrême hétérogénéité du secteur tertiaire. La difficulté majeure est liée au manque de données et d'études sur ce secteur. Ce travail vise à réconcilier différentes sources de données facilement accessibles pour modéliser le parc tertiaire, ses consommations et sa courbe de charge. La méthode développée permet de représenter le parc sous forme d'une collection de bâtiments dont chaque individu est caractérisé de manière techno-explicite par sa surface, ses caractéristiques constructives et thermiques, ses occupants, son secteur d'activité principal et ses équipements. Cette méthode permet la prise en compte des singularités du lien bâti-système-occupant qui participent à l'hétérogénéité du parc tertiaire. La méthodologie est conçue pour être applicable à tout territoire en France métropolitaine. Les résultats de modélisation des surfaces et de simulation de la consommation d'énergie ont ainsi pu être comparés aux sources existantes pour la région Île-de-France. Deux applications de la méthode sont présentées : l'étude du gisement d'économie d'énergie du secteur tertiaire de la région Île-de-France, et celle de l'autoconsommation photovoltaïque du secteur tertiaire pour la métropole d'Orléans.

MOTS CLÉS

Parc de bâtiments, Secteur tertiaire, Données en accès libre, Croisement des données, Modélisation & simulation, SIG, Economies d'énergie, Gisement renouvelable, Photovoltaïque

ABSTRACT

Energy efficiency and decarbonation of energy use in the building sector is a strategic issue of the ecological transition in France. In 2019, the French building stock accounts for 45% of the final energy consumption, with the tertiary sector alone accounting for about one third of this or 17% of national consumption. The energy consumption of the tertiary stock and its determining factors are poorly documented. Existing tertiary stock models are mostly based on an aggregated representation of the total heated surface of the building stock subdivided by its economic activity and heating energy fuel. This aggregation makes it impossible to represent the extreme heterogeneity of the sector. This work aims at reconciling different accessible databases to establish a tertiary building stock model, its consumption and its load curve. The developed method allows to represent the building stock as a collection of buildings, in which each of them is characterized individually in terms of area, constructive and thermal characteristics, occupants, main activity sector and equipment. This method allows to take account of the link between building, system and occupancy, which contributes to the heterogeneity of the tertiary sector. The methodology is designed to be applicable to any territory in metropolitan France. The results of surface area modelling and energy consumption simulation could thus be compared with existing references for the Île-de-France region. Two applications of the method are presented: the study of the energy saving potential of the tertiary sector in the Île-de-France region, and the study of photovoltaic self-consumption in the tertiary sector for the agglomeration of Orleans.

KEYWORDS

Building stock, Tertiary sector, Open data, Data fusion, Modeling & Simulation, GIS, Energy saving potential, Renewable energy potential, Photovoltaic